



**Universidade de Brasília**

Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação

**Sistema para Otimização do Gerenciamento de  
Tráfego Aéreo Brasileiro com o Programa de Opções  
de Trajetórias Colaborativo**

Lucília Pereira de Oliveira

Monografia apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Orientador  
Prof. Dr. Li Weigang

Brasília  
2018

Universidade de Brasília — UnB  
Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Ciência da Computação  
Curso de Engenharia da Computação

Coordenador: Prof. Dr. Ricardo Pezzuol Jacobi

Banca examinadora composta por:

Prof. Dr. Li Weigang (Orientador) — CIC/UnB

Prof. Dr. Alexandre Zaghetto — CIC/UnB

Prof. Dr. Camilo Chang Dórea — CIC/UnB

### **CIP — Catalogação Internacional na Publicação**

Oliveira, Lucília Pereira de.

Sistema para Otimização do Gerenciamento de Tráfego Aéreo Brasileiro com o Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo / Lucília Pereira de Oliveira. Brasília : UnB, 2018.

127 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Graduação) — Universidade de Brasília, Brasília, 2018.

1. Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo, 2. teoria dos jogos, 3. sistema de suporte à decisão, 4. alocação de *slots* e gerenciamento do tráfego aéreo.

CDU 004

Endereço: Universidade de Brasília  
Campus Universitário Darcy Ribeiro — Asa Norte  
CEP 70910-900  
Brasília-DF — Brasil



# Sistema para Otimização do Gerenciamento de Tráfego Aéreo Brasileiro com o Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo

Monografia apresentada como requisito parcial  
para conclusão do Curso de Engenharia da Computação

Prof. Dr. Alexandre Zaghetto	Prof. Dr. Camilo Chang Dórea
CIC/UnB	CIC/UnB

Prof. Dr. Ricardo Pezzuol Jacobi  
Coordenador do Curso de Engenharia da Computação

Brasília, 21 de Fevereiro de 2018

# Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Evandro e Edileusa, por terem me criado e me proporcionado o melhor que puderam oferecer e ao meu irmão Evandro Júnior pelo exemplo de determinação.

Dedico também a todos que me inspiraram e participaram da minha caminhada, principalmente a Deus.

E, por fim, a todos que possuem sonhos e esforçam-se para alcançá-los.



# Agradecimentos

Agradeço a Deus pela capacitação, força e eterno cuidado durante toda a minha vida.

Agradeço à minha família, amigos e professores, especialmente ao meu irmão Evandro Júnior e minha prima Maralize pelo constante apoio e incentivo.

Agradeço ao meu orientador Dr. Li Weigang pelas oportunidades concedidas, pelas aulas ministradas, pela sua supervisão e por acreditar em meu potencial.

Agradeço ao Dr. Leonardo Cruciol pela inspiração em seu trabalho e pelo apoio durante a pesquisa.

Agradeço ao empenho e cooperação do Dr. Li Weigang e Dr. Leonardo Cruciol que nos rendeu a aprovação do artigo "*Game Theory Approach to Brazilian Air Traffic Management Using Collaborative Trajectory Options Program*" na 13ª Conferência Internacional de *Knowledge Management In Organisations* (KMO 2018) na Eslováquia.

E, finalmente, agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a concretização deste sonho.

# Resumo

O gerenciamento de tráfego aéreo ao longo dos anos tem-se utilizado de soluções computacionais para contribuir na escolha de melhores rotas, decisões em tempo real e alocação de voos para companhias aéreas.

O Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*) (CTOP) é uma iniciativa que surgiu no Estados Unidos com o propósito de atribuir rotas para os voos de forma a reduzir o atraso e otimizar o fluxo de tráfego aéreo em áreas restritas. No Brasil, ainda não existe uma implementação semelhante ao (CTOP) já que o gerenciamento dos voos é feito pela ação dos controladores de voo e seus órgãos responsáveis.

Esta monografia apresenta um sistema que auxilia na automatização da alocação de voos e em atividades complexas de tomada de decisões com o Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo adaptado ao cenário brasileiro para otimização do gerenciamento de tráfego aéreo.

O objetivo é propor um Sistema de Suporte à Decisão com o uso de Teoria dos Jogos para que haja negociações entre as companhias aéreas de modo a reduzir os atrasos por meio da alocação dos horários dos voos em áreas restritas.

Um protótipo foi desenvolvido na linguagem PHP em que as simulações se basearam em voos reais. Este trabalho obteve importantes resultados em que foi possível reduzir em até 35% os atrasos dos voos prioritários para uma companhia aérea.

**Palavras-chave:** Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo, teoria dos jogos, sistema de suporte à decisão, alocação de *slots* e gerenciamento do tráfego aéreo.

# Abstract

The Air Traffic Management over the years has been using computing solutions in order to contribute to the choice of best routes, real-time decisions and flight allocation for airlines.

The Collaborative Trajectory Options Program (CTOP) is an initiative which emerged in the United States with the purpose of assigning routes to flights in order to decrease the delay and optimize air traffic flow in restricted areas. In Brazil, there is still no implementation similar to CTOP since flight management is done by the action of flight controllers and their responsible authorities.

This monograph presents a system that helps on automation of flights allocation and complex decision making activities with the Collaborative Trajectory Options Program adapted to the Brazilian context for optimization of air traffic management.

The objective is to propose a Decision Support System using Game Theory to negotiate between airlines in order to decrease delays by allocating flight schedules in restricted areas.

A prototype was developed using PHP language in which simulations were based on real flights. This work had important results in which it was possible to reduce priority flights delays to an airline by up to 35%.

**Keywords:** Collaborative Trajectory Options Program, game theory, decision support system, slots allocation, and air traffic management

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>19</b>
1.1	Motivação . . . . .	19
1.2	Objetivos . . . . .	20
1.3	Metodologia . . . . .	21
1.4	Estrutura do Trabalho . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>22</b>
2.1	Sistemas de Suporte à Decisão . . . . .	22
2.1.1	Conceitos Gerais . . . . .	23
2.1.2	Propriedades . . . . .	24
2.1.3	Tipos de Sistema de Suporte à Decisão . . . . .	25
2.1.4	Aplicação . . . . .	25
2.2	Teoria dos Jogos . . . . .	27
2.2.1	Conceitos Gerais . . . . .	28
2.2.2	Tipos de Jogos . . . . .	29
2.2.3	Equilíbrio de Nash . . . . .	32
2.2.4	Barganha de Nash . . . . .	34
2.2.5	Teorema de <i>Folk</i> . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Gerenciamento do Tráfego Aéreo</b>	<b>37</b>
3.1	Conceitos Gerais . . . . .	37
3.2	Espaço Aéreo do Brasil . . . . .	38
3.2.1	Órgãos Responsáveis . . . . .	38
3.2.2	Aeroportos . . . . .	40
3.2.3	Serviços de Tráfego Aéreo . . . . .	41
3.2.4	Fases do Voo . . . . .	41
3.2.5	Alocação de <i>Slots</i> . . . . .	43
3.2.6	Separação entre Aeronaves . . . . .	44

3.3	Tomada de Decisão Colaborativa - CDM . . . . .	45
3.3.1	Definições Gerais . . . . .	45
3.3.2	A-CDM . . . . .	45
3.3.3	Aplicação . . . . .	47
3.4	Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo - CTOP . . . . .	49
3.4.1	Conjunto de Opções de Trajetória - TOS . . . . .	51
3.4.2	Aplicação . . . . .	53
3.4.3	CTOP no Brasil . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>59</b>
4.1	Alocação de <i>Slots</i> com CDM e Teoria de Jogos . . . . .	59
4.2	Alocação de <i>Slots</i> com Algoritmo <i>Greedy</i> no CTOP . . . . .	62
4.3	Alocação de <i>Slots</i> com Teoria dos Jogos no CTOP . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Modelagem e Implementação</b>	<b>69</b>
5.1	Descrição do Sistema . . . . .	69
5.2	Aplicação do CTOP . . . . .	70
5.3	Negociação com Teoria dos Jogos . . . . .	75
5.3.1	Definições Iniciais da Negociação . . . . .	75
5.3.2	Definições Iniciais do Jogo . . . . .	76
5.3.3	Aplicação de Teoria dos Jogos . . . . .	77
5.3.4	Modelagem da Negociação com Teoria dos Jogos . . . . .	79
5.4	Banco de Dados . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Estudo de Caso</b>	<b>86</b>
6.1	Ambiente de Teste . . . . .	86
6.2	Planejamento . . . . .	86
6.2.1	Condições Iniciais para a Execução do CTOP . . . . .	87
6.2.2	Condições Iniciais para a Negociação com Teoria dos Jogos . . . . .	90
6.3	Execução . . . . .	91
6.4	Resultados . . . . .	105
6.4.1	Caso 1: 50%B e 50%A . . . . .	105
6.4.2	Caso 2: 67%B e 33%A . . . . .	108
6.4.3	Caso 3: 75%B e 25%A . . . . .	112
<b>7</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>117</b>
7.1	Avaliação dos Resultados . . . . .	117
7.2	Trabalhos Futuros . . . . .	119

Referências	120
Apêndice	124
A Tabelas do Estudo de Caso	125

# Lista de Figuras

2.1	Processo de Tomada de Decisão em um DSS (Adaptada) [1]. . . . .	23
2.2	Tela do FACET Apresentando o Tráfego nas Rotas e as Estatísticas do Fluxo Aéreo [2]. . . . .	26
2.3	Esquemático da Arquitetura dos Agentes (Adaptada) [3]. . . . .	27
3.1	Divisão por Região de Informação de Voo (Adaptada) [4]. . . . .	39
3.2	Aeroportos do Brasil [5]. . . . .	40
3.3	Fases de Voo (Adaptada) [6]. . . . .	42
3.4	<i>Collaborative Decision Making</i> [7]. . . . .	46
3.5	Exemplo de FCA's [8]. . . . .	50
3.6	Exemplo de TOS [9]. . . . .	53
3.7	Interface Gráfica com a FCA (Adaptada) [10]. . . . .	54
3.8	Interface Gráfica com CTOP (Adaptada) [10]. . . . .	54
3.9	Interface Gráfica com as Rotas dos Voos Atribuídas (Adaptada) [10]. . . .	55
3.10	Alocação Final dos Voos (Adaptada) [10]. . . . .	55
3.11	Rota de SBAR para SBGR [11]. . . . .	56
4.1	Conflito entre Duas Aeronaves na Tentativa de Ocupação de um <i>Slot</i> [12]. .	60
4.2	Processo de Percorrimento da Fila de Decolagens para Negociação [12]. . .	61
4.3	Procedimentos de Otimização (Adaptada) [9]. . . . .	62
4.4	Árvore de Busca Agrupada por FCA (Adaptada) [9]. . . . .	63
4.5	Exemplo do Algoritmo de Busca (Adaptada) [9]. . . . .	64
4.6	Comparação entre Resultados (Adaptada) [9]. . . . .	65
4.7	Visão Geral do Modelo em Teoria dos Jogos [8]. . . . .	66
4.8	Movimentos dos Jogo [8]. . . . .	67
4.9	Comparação dos Resultados entre <i>Greedy</i> e Teoria dos Jogos para Cia. A [8].	68
5.1	Captura de Tela do Sorteio da Distribuição dos Voos. . . . .	71
5.2	Captura de Tela do Sorteio dos <i>Slots</i> Disponíveis nas FCA's. . . . .	71
5.3	Captura de Tela do Sorteio do EAT das FCA's. . . . .	72

5.4	Captura de Tela da Ordenação por IAT das FCA's. . . . .	72
5.5	Captura de Tela da Lista Final do CTOP. . . . .	73
5.6	Modelagem da Execução do CTOP. . . . .	74
5.7	Captura de Tela do Sorteio dos Voos Prioritários. . . . .	79
5.8	Captura de Tela do Histórico de Jogadas. . . . .	80
5.9	Captura de Tela da Lista Final de Negociação. . . . .	81
5.10	Modelagem da Negociação com Teoria dos Jogos. . . . .	82
5.11	Modelo Completo. . . . .	83
5.12	Modelo Entidade Relacionamento do CTOP. . . . .	84
5.13	Modelo Entidade Relacionamento do Jogo. . . . .	85
6.1	Mapa do Brasil com as FCA's e os Aeroportos Utilizados (Adaptada) [13].	88
6.2	Atraso Global da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	106
6.3	Atraso Global da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	107
6.4	Atraso Prioritário da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	107
6.5	Atraso Prioritário da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	108
6.6	Média dos Atrasos Globais . . . . .	109
6.7	Média dos Atrasos Prioritários . . . . .	109
6.8	Atraso Global da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	110
6.9	Atraso Global da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	110
6.10	Atraso Prioritário da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	111
6.11	Atraso Prioritário da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	111
6.12	Média dos Atrasos Globais. . . . .	112
6.13	Média dos Atrasos Prioritários . . . . .	112
6.14	Atraso Global da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	113
6.15	Atraso Global da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	113
6.16	Atraso Prioritário da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	114
6.17	Atraso Prioritário da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	115
6.18	Média dos Atrasos Globais . . . . .	115
6.19	Média dos Atrasos Prioritários . . . . .	116



# Lista de Tabelas

2.1	Matriz de Resultados - Dilema dos Prisioneiros . . . . .	31
2.2	Matriz de Resultados - Batalha dos Sexos . . . . .	33
3.1	Exemplo de EAT . . . . .	51
3.2	Exemplo de <i>Slots</i> Disponíveis nas FCA's . . . . .	52
3.3	Exemplo de IAT . . . . .	52
3.4	Exemplo de Alocação Final do CTOP . . . . .	52
4.1	Resultado de Desempenho da Fila Antes e Depois da Negociação [12] . . .	62
6.1	Ambiente de Testes . . . . .	86
6.2	Capacidade por Período em cada FCA durante o CTOP . . . . .	89
6.3	<i>Slots</i> Disponíveis . . . . .	92
6.4	EAT dos Voos Ordenados por IAT . . . . .	93
6.5	Resultado do CTOP para os Voos de Exceção . . . . .	93
6.6	Resultado do CTOP para Voos Normais . . . . .	93
6.7	Resultado do CTOP para Voos sem <i>Slot</i> . . . . .	96
6.8	Atraso Global da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	98
6.9	Atraso Global da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	99
6.10	Atraso Prioritário da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	100
6.11	Atraso Prioritário da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	100
6.12	Histórico do Jogo . . . . .	100
6.13	Negociação de <i>Slots</i> da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	102
6.14	Negociação de <i>Slots</i> da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	102
6.15	Novo Atraso Global da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	103
6.16	Novo Atraso Global da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	104
6.17	Novo Atraso Prioritário da <i>CompanhiaA</i> . . . . .	105
6.18	Novo Atraso Prioritário da <i>CompanhiaB</i> . . . . .	105
7.1	Melhores Resultados dos Atrasos Prioritários com Jogos . . . . .	118

A.1 Voos Utilizados . . . . .	125
-------------------------------	-----

# Lista de Abreviaturas e Siglas

**A-CDM** Tomada de Decisão Colaborativa em Aeroportos (*Airport - Collaborative Decision Making*).

**ACC** Centro de Controle de Área (*Area Control Centre*).

**ANAC** Agência Nacional de Aviação Civil.

**APP** Controle de Aproximação (*Approach Control Unit*).

**ASM** Gerenciamento do Espaço Aéreo (*Air Space Management*).

**ATC** Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control*).

**ATFM** Gerenciamento do Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management*).

**ATM** Gerenciamento do Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management*).

**ATS** Serviços de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Services*).

**BDR** Base de Referência.

**CDM** Tomada de Decisão Colaborativa (*Collaborative Decision Making*).

**CFMU** *Central Flow Management Unit*.

**CGNA** Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea.

**CINDACTA** Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo.

**CIS** Central Integrada de SLOT do CGNA.

**CTOP** Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*).

**CTR** Zona de Controle (*Control Terminal Region*).

**DECEA** Departamento de Controle do Espaço Aéreo.

**DFW** Aeroporto Internacional Dallas/Fort Worth.

**DSS** Sistema de Suporte à Decisão (*Decision Support System*).

**EAT** *Early Arrival Time*.

**FAA** Administração Federal de Aviação dos EUA (*Federal Aviation Administration*).

**FACET** *Future ATM Concepts Evaluation Tool*.

**FAOR** Aeroporto Internacional Oliver Tambo - África do Sul.

**FCA** Área Restrita de Fluxo (*Flow Constraint Area*).

**FIFO** Primeiro a Chegar, Primeiro a Sair (*First In, First Out*).

**FIR** Região de Informação de Voo (*Flight Information Region*).

**IAT** *Initial Arrival Time*.

**IFR** Regras de Voo por Instrumentos (*Instrument Flight Rules*).

**JFK** Aeroporto Internacional John F. Kennedy.

**KMCO** Aeroporto Internacional de Orlando.

**KMIA** Aeroporto Internacional de Miami.

**LGA** Aeroporto LaGuardia.

**NOTAM** Aviso aos Aeronavegantes (*Notice to Airmen*).

**ORD** Aeroporto Internacional Chicago O'Hare.

**RMNT** *Required Minimum Notification Time*.

**RTC** *Relative Trajectory Cost*.

**SBAR** Aeroporto de Aracaju - Santa Maria.

**SBBE** Aeroporto Internacional de Belém.

**SBBH** Aeroporto de Belo Horizonte - Pampulha.

**SBBR** Aeroporto Internacional de Brasília.

**SBCF** Aeroporto Internacional de Belo Horizonte - Confins.

**SBCG** Aeroporto Internacional de Campo Grande.

**SBCY** Aeroporto Internacional de Cuiabá.

**SBEG** Aeroporto Internacional de Manaus.

**SBFZ** Aeroporto Internacional de Fortaleza.

**SBGL** Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão.

**SBGO** Aeroporto de Goiânia.

**SBGR** Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos.

**SBJP** Aeroporto Internacional de João Pessoa - Bayeux.

**SBKP** Aeroporto Internacional de Viracopos - Campinas.

**SBMO** Aeroporto Internacional de Maceió - Zumbi dos Palmares.

**SBPJ** Aeroporto de Palmas.

**SBRF** Aeroporto Internacional do Recife.

**SBRJ** Aeroporto do Rio de Janeiro - Santos Dumont.

**SBSG** Aeroporto Internacional de São Gonçalo do Amarante - Natal.

**SBSL** Aeroporto Internacional de São Luís.

**SBSP** Aeroporto de São Paulo - Congonhas.

**SBSV** Aeroporto Internacional de Salvador.

**SBTE** Aeroporto de Teresina.

**SGBD** Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados.

**TGL** Toque e Arremetida (*Touch and Go Landing*).

**TMA** Área de Controle de Terminal (*Terminal Manoeuvring Area*).

**TOS** Conjunto de Opções de Trajetória (*Trajectory Options Set*).

**TVET** *Trajectory Valid End Time.*

**TVST** *Trajectory Valid Start Time.*

**TWR** Torre de Controle de Aeródromo (*Aerodrome Control Tower*).

**VFR** Regras de Voo Visual (*Visual Flight Rules*).

# Capítulo 1

## Introdução

A evolução da computação tem proporcionado sistemas que auxiliam em automatização de processos e em atividades complexas de tomada de decisões. Durante os últimos anos, o gerenciamento de tráfego aéreo tem-se utilizado de soluções computacionais para contribuir na eficiência dos serviços prestados e reduzir possíveis falhas humanas.

Atualmente no Brasil, o gerenciamento dos setores de aviação é feito pelos órgãos responsáveis pelo espaço aéreo, o qual controlam o fluxo aéreo brasileiro que é realizado com a ajuda de controladores de voos.

Gerenciar o tráfego aéreo implica em lidar com situações que envolvem uma grande demanda de voos, condições climáticas adversas, preocupações à respeito da segurança e até mesmo a equidade entre companhias aéreas [2]. Em vista da complexidade dessa ação, percebe-se a necessidade de soluções que auxiliem nessa importante tarefa.

O foco específico deste trabalho é a parte de gerenciamento do fluxo de tráfego aéreo que lida com a tomada de decisões para fatores imprevisíveis que exigem mudanças nas rotas previamente planejadas para novas rotas, o qual é a área de atuação do Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*) (CTOP).

A proposta de implementação consiste em criar um Sistema de Suporte à Decisão que utiliza os conceitos principais do CTOP adaptado ao contexto aéreo brasileiro com a inserção de técnicas de Teoria dos Jogos.

### 1.1 Motivação

A computação está fortemente presente no dia-a-dia e é utilizada nas mais variadas áreas para auxiliar ou completamente gerar a automação de processos e tarefas já que sua evolução nos últimos anos tem resultado em maior precisão, rapidez e eficiência.

Uma área que tem crescido o uso de soluções computacionais é a aviação de modo a reduzir a atuação humana em áreas mais suscetíveis a erros e aprimorar os serviços efetuados com a inserção da tecnologia.

Uma quantidade significativa da população brasileira usufrui dos serviços fornecidos pelo setor da aviação, sendo que os fatores que mais influenciam nessa escolha pelo transporte aéreo são custo, tempo e conforto.

A cada ano que passa o índice de atrasos nos aeroportos cai, porém continua-se tendo um valor considerável e seu impacto não pode ser desprezado, principalmente, quando busca-se melhorar o transporte aéreo [14].

Existem vários programas que têm por finalidade melhorar o tráfego aéreo e o Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*) (CTOP) é um desses programas, o qual foi criado com o propósito de regular a demanda de voos em um espaço aéreo restrito [15].

Além disso, um Sistema de Suporte à Decisão (*Decision Support System*) (DSS) pode ser usado para auxiliar na otimização de gerenciamento do tráfego aéreo no que se refere a tomada de decisões importantes, assim como, a Teoria dos Jogos, a qual possui técnicas que visam alcançar os melhores resultados possíveis.

## 1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal apresentar uma proposta de solução para o gerenciamento eficiente do tráfego aéreo brasileiro para áreas restritas.

O intuito é utilizar algoritmos que reduzam o tempo de atraso dos voos com a implementação da iniciativa do Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*) e o uso de Teoria dos Jogos para o contexto do cenário brasileiro.

Objetivos específicos consistem em:

- Simular as condições aéreas do Brasil com a inclusão de áreas de restrição que permitam verificar a aplicabilidade da solução proposta.
- Desenvolver um Sistema de Suporte à Decisão que faça a alocação eficiente dos horários dos voos, chamados de *slots*, com a adaptação do CTOP para o contexto aéreo do Brasil.
- Incorporar técnicas de Teoria dos Jogos para otimizar o algoritmo.



## 1.3 Metodologia

O trabalho foi realizado com a seguinte metodologia de pesquisa:

- **Levantamento de dados:** é definido através do estudo do contexto aéreo brasileiro e da captura de aeroportos e voos para o desenvolvimento da solução.
- **Levantamento do estado da arte:** é realizado através do estudo das soluções computacionais atuais que envolvem alocação de *slots*, CTOP e Teoria dos Jogos para análise e aprofundamento dos trabalhos existentes.
- **Definição da arquitetura:** é feita pela organização da solução, a estruturação dos dados e os métodos de desenvolvimento para a modelagem do projeto.
- **Implementação:** é a aplicação prática para a solução do problema.
- **Simulação:** ocorre por meio de casos de teste e cenários para geração de resultados.
- **Análise dos resultados:** obtém-se por meio da análise dos dados das simulações para verificação da eficiência da aplicação.

## 1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 7 capítulos, sendo este o primeiro capítulo com a introdução do que será abordado ao longo do trabalho.

O Capítulo 2 irá apresentar a fundamentação teórica com a abordagem dos conceitos elementares de Sistema de Suporte à Decisão e Teoria dos Jogos utilizados na solução do problema.

O Capítulo 3 irá introduzir os assuntos relevantes de gerenciamento do tráfego aéreo como o espaço aéreo brasileiro, a tomada de decisão colaborativa e o CTOP para a melhor compreensão desta pesquisa.

O Capítulo 4 irá abordar o estado da arte com as soluções existentes relevantes com uso de alocação de *slots*, CTOP e Teoria dos Jogos para o entendimento deste trabalho.

O Capítulo 5 irá retratar as decisões do projeto quanto a modelagem e implementação com a descrição detalhada do algoritmo do CTOP e da aplicação de Teoria dos Jogos.

O Capítulo 6 irá expor a definição dos estudos de casos desenvolvidos, a validação do modelo e os resultados obtidos.

E, por fim, o capítulo 7 irá encerrar este trabalho com as considerações finais e a proposta de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

O capítulo irá abordar os principais aspectos teóricos para a melhor compreensão desta pesquisa em que serão introduzidos os principais conceitos sobre Sistemas de Suporte à Decisão e Teoria dos Jogos com Equilíbrio de Nash, Barganha de Nash e Teorema de *Folk*.

### 2.1 Sistemas de Suporte à Decisão

Atualmente, a atuação direta do ser humano em lidar com situações complexas de resolução de problemas tem diminuído em detrimento do uso de soluções computacionais mais eficientes e mais rápidas.

A habilidade de processar e armazenar informação têm suas limitações considerando a mente humana, pois o ser humano pode, normalmente, ter dificuldades em relembrar e usar a informação de forma livre de erros [16].

Um Sistema de Suporte à Decisão (*Decision Support System*) (DSS) bem-sucedido lida com taxas de dados potencialmente elevadas, age de forma inteligente e cooperativa em um domínio complexo e pode tomar decisões como os melhores especialistas da área [17].

Sistema de Suporte à Decisão é uma solução computacional que pode auxiliar o complexo processo de tomada de decisões e resolução de problemas [1]. O estudo nessa área foca em como tecnologia da informação pode melhorar a eficiência em que um usuário toma decisões, assim como, a eficácia dessas decisões [18].

Segundo Scott Morton [19], DSS são sistemas interativos baseados em computadores que utilizam dados e modelos para resolver problemas não-estruturados os quais ajudam a tomar decisões. Melhoram a qualidade das decisões, pois acoplam os recursos intelectuais dos indivíduos com os recursos computacionais para lidar com problemas semiestruturados [20].

### 2.1.1 Conceitos Gerais

Um Sistema de Suporte à Decisão pode ser construído a partir do momento em que se tem uma definição concisa e bem estruturada do problema que irá ser abordado.

A Figura 2.1 ilustra um modelo de processo de tomada de decisão em um DSS. A primeira etapa consiste em reconhecer o problema a ser estudado e, a partir disso, é possível elaborar a definição do problema para facilitar a criação de modelos.

Em seguida, gera-se soluções alternativas, desenvolvimento de modelos e análise dessas alternativas. Além disso, tem-se a escolha da melhor alternativa e, por fim, tem-se a implementação da opção escolhida [1].

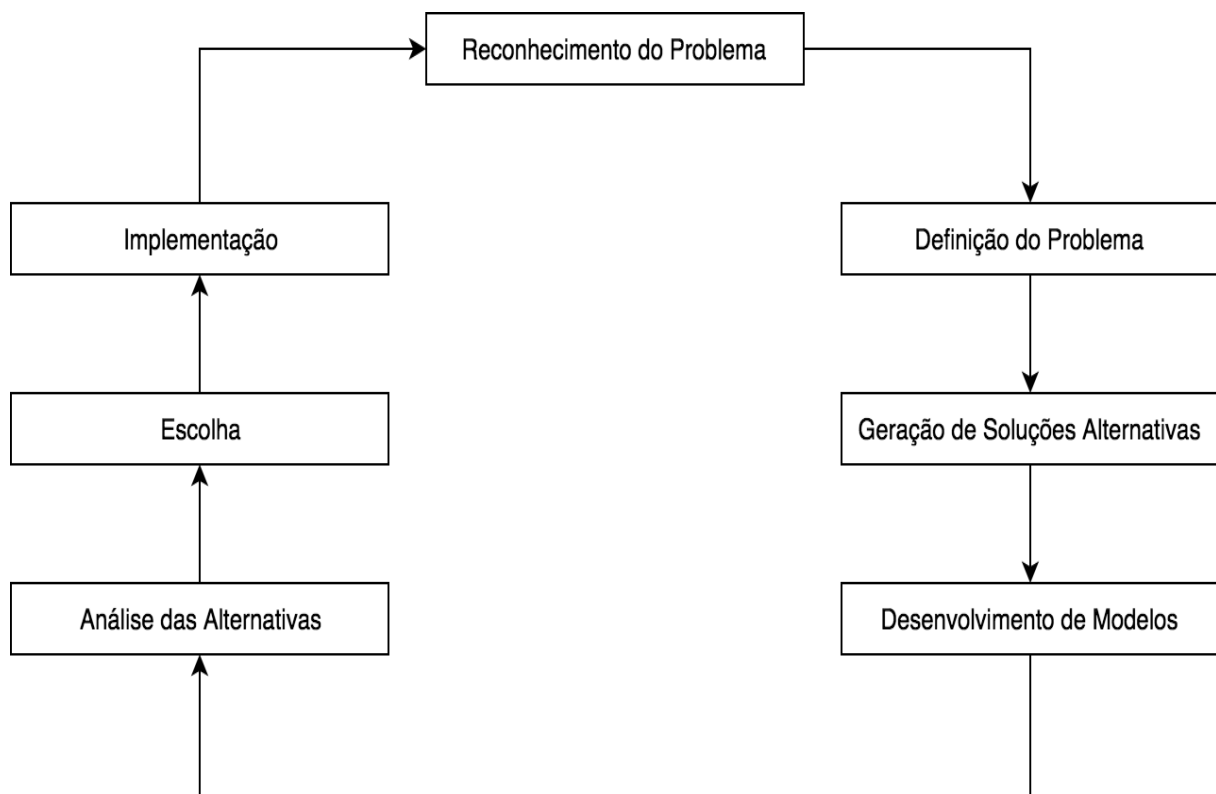


Figura 2.1: Processo de Tomada de Decisão em um DSS (Adaptada) [1].

Existem várias vantagens para o uso dos Sistemas de Suporte à Decisão, segundo Aronson, Liang e Turban [21], as principais razões são:

- **Cálculos rápidos:** é possível fazer vários cálculos computacionais de forma rápida e a um baixo custo que podem ser cruciais para diversas situações como para um médico numa sala de emergência ou para um investidor na bolsa de valores.

- **Aumento na produtividade:** um sistema computadorizado pode reduzir o custo e tamanho de uma equipe especializada, além de permitir a atuação em localidades diferentes.
- **Suporte técnico:** como os dados podem ser armazenados em banco de dados em vários tipos de formatos e com fácil acesso, podem permitir que as decisões envolvam cálculos complexos.
- **Acesso a grande quantidade de dados:** permite o armazenamento de um grande volume de dados que podem ser necessários com o propósito de organizar e buscar informação.
- **Suporte de qualidade:** como mais dados podem ser acessados com facilidade, rapidez e baixo custo, tem-se maior qualidade das decisões tomadas.
- **Vantagem competitiva:** podem criar uma significativa autonomia e poder ao permitir que boas decisões sejam tomadas diante de cenários de competição.

### 2.1.2 Propriedades

Propriedade e características importantes de Sistemas de Suporte à Decisão de acordo com Beulens e Nunen [22]:

- Permitem tomar decisões em ambientes dinâmicos.
- Feitos para apoiarem o processo de decisão de forma que aspectos qualitativos como também quantitativos têm um papel fundamental.
- Elaborados para apoiarem uma ou mais fases no processo de tomada de decisão.
- São principalmente orientados para situações futuras em que são utilizados dados históricos e modelos para gerar e avaliar previsões e decisões alternativas.
- Podem ser direcionados a partir de comparações de decisões alternativas baseadas em dados armazenados no banco de dados.
- Devem ser integrados no processo de tomada de decisão, assim como podem profundamente afetar a organização desse processo.
- Devem permitir simples uso e controle ao usuário.
- Devem ser flexíveis e adaptáveis a mudanças.
- Dependem de dados internos e externos tal como banco de dados.

### 2.1.3 Tipos de Sistema de Suporte à Decisão

Um Sistema de Suporte à Decisão pode ser classificado em [8]:

- **Sem autonomia:** o sistema gera dados, mas cabe ao ser humano analisar as informações e tomar as decisões de modo que o resultado do sistema tenha aplicabilidade.
- **Autonomia completa:** o sistema realiza todas as etapas, desde receber os dados até analisá-los e tomar as devidas decisões.
- **Semiautomático (mais automático):** o sistema é capaz de atuar de forma completa dependendo do cenário, porém pode ser que em certas situações seja necessário a intervenção do ser humano.
- **Semiautomático (mais humano):** o sistema recebe os dados, trata-os e gera decisões, entretanto deixa a cargo do ser humano tomar a decisão final.

Este trabalho irá utilizar uma abordagem com um Sistema de Suporte à Decisão semiautomático mais humano em que deixará a cargo de um especialista a decisão final.

### 2.1.4 Aplicação

Um exemplo de DSS é a abordagem de Agogino e Tumer com Sistemas Multiagentes que utiliza o *Future ATM Concepts Evaluation Tool* (FACET), uma ferramenta de modelagem que define modelos precisos para o complexo problema de gerenciamento de tráfego aéreo dos EUA [2].

Sistemas multiagentes são quando dois ou mais agentes se juntam para realizar um conjunto de ações usando sistemas computacionais [23]. Um agente consiste em tomar uma atitude de acordo com a percepção adquirida, ou seja, em executar uma ação segundo uma sequência de percepções específicas do ambiente inserido [24].

FACET é um sistema que simula o tráfego aéreo baseado em planos de voos e permite ao usuário analisar os padrões de congestionamento de diferentes setores através de uma interface gráfica. Permite também ao usuário mudar os padrões de fluxo das aeronaves através de vários mecanismos [2]. O FACET pode ser visualizado na Figura 2.2.

O sistema foi criado com o propósito de atuar no impacto dos atrasos das aeronaves em solo e redefinição de rotas entre aeronaves, além de lidar com o acoplamento entre as ações dos agentes e melhorar a previsibilidade de recompensas dos agentes com o uso de valores computados.

Os agentes nesse caso foram atribuídos a localizações individuais no solo que compreendessem todo o espaço aéreo e cada agente seria responsável por qualquer aeronave que

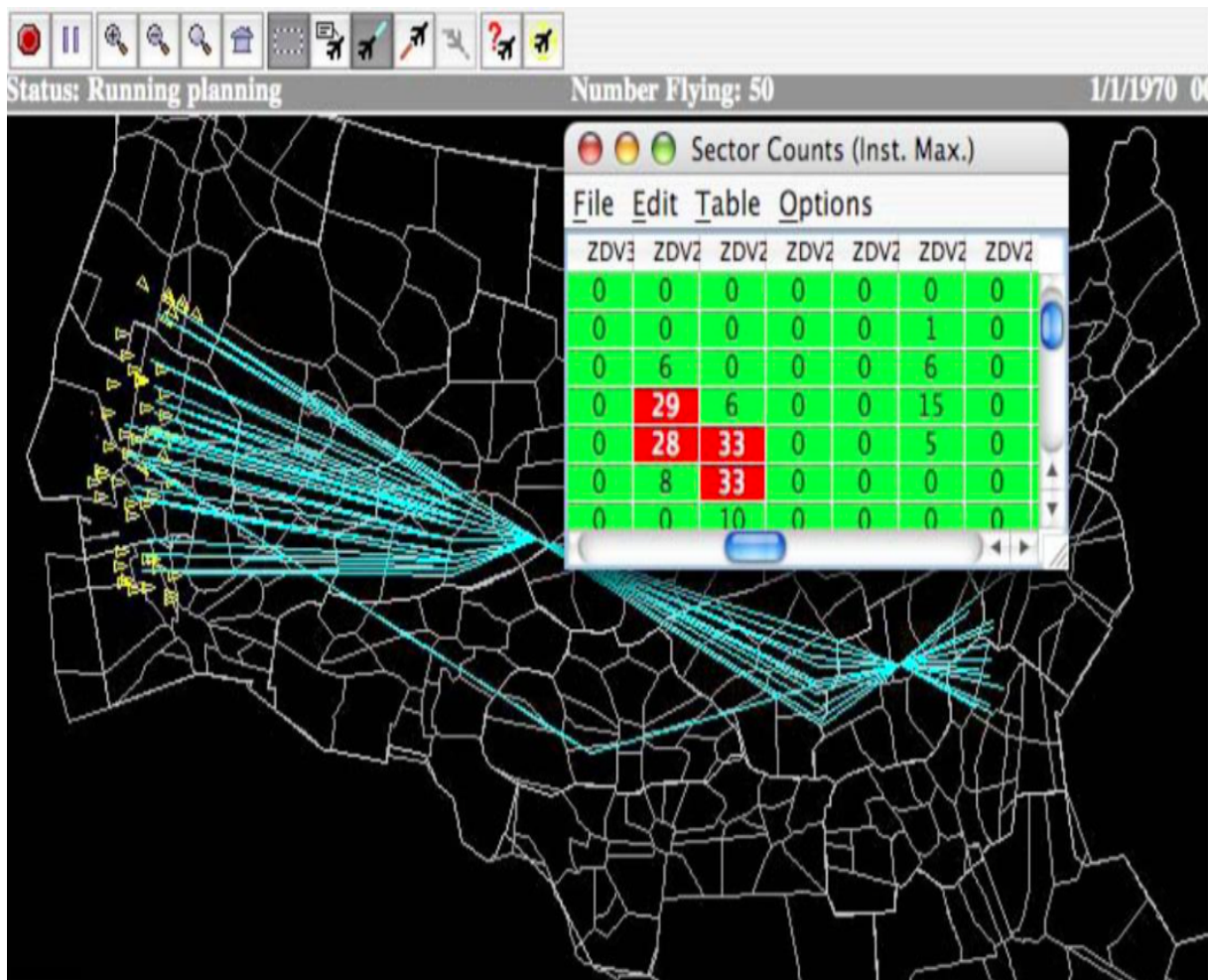


Figura 2.2: Tela do FACET Apresentando o Tráfego nas Rotas e as Estatísticas do Fluxo Aéreo [2].

passasse por essa localização [3]. A Figura 2.3 mostra os agentes com suas respectivas aeronaves ao redor de um possível congestionamento.

A ideia do DSS é que os múltiplos agentes acessam o FACET para simular o tráfego aéreo com base na medição, atrasos no solo ou nas ordens de redefinição de rotas, para conseguir informações de rotas de tráfego e estatísticas do fluxo aéreo e, portanto, para que auxilie no processo de tomada de decisão. E, após suas ações, eles podem ter acesso ao sistema para saber qual foi o impacto delas, ou seja, a recompensa.

O DSS permite que os agentes interajam entre si para atingirem melhores resultados, entretanto, as ações dos agentes são apenas sugestões, as decisões finais são tomadas por controladores humanos caracterizando um sistema semiautomático mais humano.

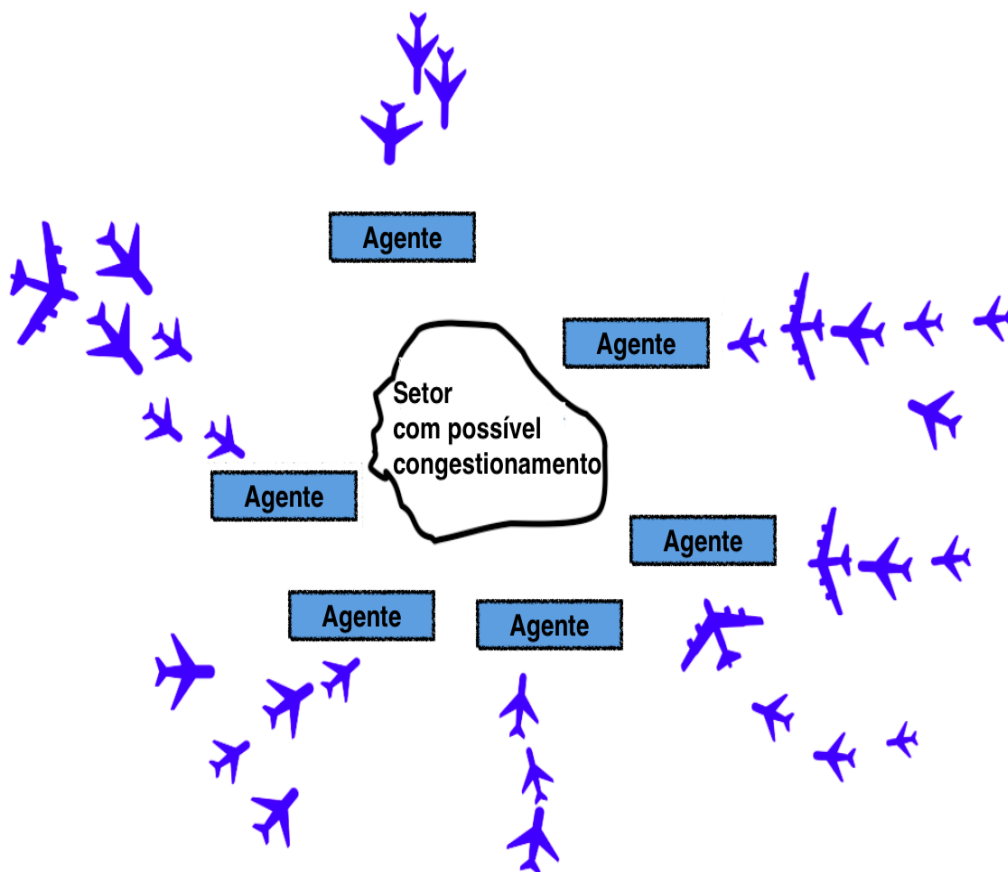


Figura 2.3: Esquemático da Arquitetura dos Agentes (Adaptada) [3].

## 2.2 Teoria dos Jogos

Os primeiros esboços sobre Teoria dos Jogos surgiram em 1945 com as ideias que exibem a conciliação da visão do matemático John von Neumann e do economista Oskar Morgenstern [25].

Teoria dos jogos é o estudo sobre conflito e cooperação de indivíduos racionais e capazes de tomarem decisões utilizando modelos matemáticos, ou seja, a análise das atitudes tomadas pelos participantes que podem influenciar o estado um do outro por meio de técnicas matemáticas [26].

Segundo Osborne e Rubinstein [27], apesar de poder usar matemática, não está intrinsecamente ligada a ela, pois trata-se do estudo das interações e disputas de interesse entre os jogadores envolvidos.

Teoria dos jogos pode ser definida também como uma aplicação voltada a situações sociais que visa que seres racionalmente inteligentes busquem ter a maior vantagem possível diante das circunstâncias estabelecidas no jogo [28].

Uma outra área de atuação da teoria dos jogos é sua aplicação no processo de tomada de decisão diante da negociação dos jogadores.

### 2.2.1 Conceitos Gerais

Segundo Norvig [24], jogos referem-se a problemas entre adversários em que os objetivos dos agentes são conflitantes. Não é difícil representar a situação de um jogo, pois normalmente existe um número limitado de ações em que os resultados procedem de regras bem definidas.

Os jogos podem possuir características como: terem múltiplos agentes, em que há no mínimo dois participantes; possuírem interdependência dos resultados, já que o jogo depende das decisões dos jogadores; apresentarem racionalidade, considerando que as decisões são tomadas visando o melhor resultado; e compartilharem conhecimento comum, tendo em vista que as regras e estrutura do jogo devem ser conhecidas entre todos os envolvidos [29].

Segundo von Neumann [25], pode-se inferir os seguintes conceitos:

- **Jogo:** é simplesmente a totalidade das regras que o descrevem. É uma sequência de movimentos.
- **Regras:** são condições precisamente prescritas, comandos absolutos. Se forem infringidas, então toda a transação por definição deixa de ser o jogo descrito por essas regras e são diferentes das estratégias do jogo.
- **Jogadores:** participantes do jogo.
- **Jogada:** é cada instância em particular em que o jogo é especialmente jogado do começo ao fim. É uma sequência de escolhas.
- **Movimentos:** são os elementos principais do jogo. Um movimento é a ocasião de uma escolha entre várias alternativas a ser feita por um dos jogadores de acordo com as regras do jogo. Os movimentos estão relacionados com as escolhas da mesma forma como o jogo é para a jogada.
- **Estratégias:** princípios gerais que regem livremente as escolhas dos jogadores, sendo que podem ser boas ou ruins, desde que sejam interpretadas em um sentido exato e que o jogador possa escolher entre aceitar e rejeitar.

Suponha que o jogo seja a simples disputa de par ou ímpar entre dois jogadores, jogador 1 e jogador 2.



As regras são que um participante do jogo tenha direito a escolher a opção par ou ímpar em que jogador adversário necessariamente escolha a opção contrária e cada jogador só pode escolher um único número.

Após a escolha dos números pelos jogadores, os jogadores revelam simultaneamente suas escolhas de número e, se a soma dos dois números escolhidos pelos jogadores for par, vence o jogador que escolheu par e perde o que escolheu ímpar e, analogamente, caso a soma seja ímpar.

As alternativas que os jogadores possuem, de forma simplificada, são de 0 a 9, ou seja, os movimentos que eles podem escolher estão entre 0 e 9.

Suponha que o jogador 1 escolhe par e o jogador 2 escolhe ímpar, e que a estratégia do jogador 1 seja se abster da decisão e escolher 0, enquanto o jogador 2 escolhe a estratégia de usar seu número favorito que é 7.

Logo, a jogada é que o jogador 1 jogou 0, enquanto o jogador 2 jogou 7, e o resultado final do jogo é que o jogador 2 venceu enquanto o jogador 1 perdeu.

## 2.2.2 Tipos de Jogos

Os jogos podem ser classificados quanto a [29, 30]:

### 1. Regra

- **Jogos baseados em regras:** os quais os jogadores seguem regras bem definidas.
- **Jogos de desenvolvimento livre:** os quais os jogadores não ficam restritos às regras.

### 2. Cooperação:

- **Jogos cooperativos:** os quais os jogadores cooperam para obter melhores resultados.
- **Jogos não-cooperativos:** os quais os jogadores competem individualmente.

### 3. Informação

- **Jogos de informação perfeita:** os quais os jogadores possuem conhecimento de todas as informações até aquele exato momento e da sequência de eventos ocorridos.
- **Jogos de informação imperfeita:** os quais os jogadores não possuem conhecimento de todas as informações até aquele exato momento e da sequência de eventos ocorridos.

- **Jogos de informação completa:** os quais os jogadores conhecem informações dos demais jogadores.
- **Jogos de informação incompleta:** os quais os jogadores não conhecem todas as informações dos demais jogadores, podem conhecer parcialmente ou não conhecer nada.

#### 4. Dinâmica:

- **Jogos estáticos/simultâneos:** os quais os jogadores tomam sua decisão uma única vez, sendo que as decisões são ao mesmo tempo e não são baseadas nas decisões de outros jogadores.
- **Jogos dinâmicos/sequências:** os quais os jogadores possuem uma sequência para tomar as decisões, sendo que as decisões podem vir após as decisões de outros jogadores e os jogadores podem tomar novas decisões ao longo do jogo.

#### 5. Horizonte temporal

- **Jogos finitos:** os quais têm um número estabelecido de etapas.
- **Jogos infinitos:** os quais podem se prolongar indefinidamente.

#### 6. Dimensão:

- **Jogos discretos:** os quais têm número de jogadores finito e número finito de escolhas disponíveis a tomar.
- **Jogos contínuos:** os quais têm um conjunto denso de possíveis decisões para escolher.

#### 7. Resultado final

- **Jogos de soma zero:** os quais independe das ações dos jogadores, jogos que a soma final das entradas e saídas se mantém constante.
- **Jogos de soma não-zero:** os quais os jogadores influenciam no valor global e o resultado final não é constante.

Nessa pesquisa, serão utilizados jogos baseados em regras, não-cooperativos, de informação incompleta, dinâmicos, finitos, discretos e de soma não-zero.

## Dilema dos Prisioneiros

O “Dilema dos Prisioneiros” é um clássico exemplo de teoria dos jogos de um jogo não-cooperativo que foi originado por Merrill Flood e Melvin Dresher e formalizado por Albert W. Tucker em 1950 [31].

Existem várias versões para o Dilema dos Prisioneiros, a versão típica é que dois homens foram presos porque a polícia estava certa de que eles tinham cometido um crime juntos e colocou-os na solitária de forma que eles não pudessem se comunicar um com o outro.

A polícia não tinha evidências o suficiente para condená-los pelo crime o qual eles supostamente tinham cometido, entretanto ela podia condená-los por posse ilegal de armas de fogo, o que daria a sentença de 1 ano para cada.

O único jeito de condená-los por um crime mais sério seria se os prisioneiros testificassem um contra o outro, então a polícia oferece aos prisioneiros individualmente o seguinte acordo:

- Se um prisioneiro confessar o crime e seu parceiro se negar a confessar, o que cooperou fica livre enquanto o que se negou pega 3 anos de prisão.
- Se ambos confessarem, cada um pega 2 anos de sentença.
- Se ambos se negarem a confessar, cada um pega 1 ano de sentença.

Os prisioneiros poderiam pensar que ambos não testificariam e poderiam pegar a sentença leve de 1 ano. Porém, como eles não podem se comunicar, um dos prisioneiros poderia pensar que seu parceiro não testificaria e se ele cooperasse com a polícia poderia ficar livre. E, se ambos tivessem o pensamento de cooperar com a polícia, resultaria em 2 anos de sentença para cada.

Logo, os prisioneiros ficam em um dilema já que cada um quer o bem para si próprio. A Tabela 2.1 mostra a matriz de resultados do Dilema dos Prisioneiros.

Tabela 2.1: Matriz de Resultados - Dilema dos Prisioneiros

		Prisioneiro A	
		Negar	Confessar
Prisioneiro B	Negar	1,1	3,0
	Confessar	0,3	2,2

Segundo Rasmusen [32], a melhor resposta é fortemente a melhor se não há outras estratégias que são igualmente boas e que uma estratégia dominante é estritamente a melhor resposta para qualquer estratégia que outros jogadores possam escolher. Portanto,

o equilíbrio dominante seria a combinação da escolha da estratégia dominante por cada jogador.

Se o prisioneiro pensasse que seu parceiro fosse se negar a cooperar, ele teria duas alternativas: se negar também e pegar 1 ano de prisão ou confessar e ficar livre. Se o prisioneiro pensasse que seu parceiro fosse confessar, as opções seriam: confessar também e pegar 2 anos de prisão ou se negar e pegar 3 anos de prisão.

Nesse caso, a estratégia dominante seria a seguinte: caso seu parceiro confessasse ou se negasse os melhores cenários seriam que ele confessasse porque ele poderia ficar livre ou pegar 2 anos de prisão, respectivamente. E, como o parceiro tem as mesmas opções, o incentivo seria de tomar a mesma atitude, dessa forma, o equilíbrio dominante seria que os dois confessassem e que ambos pegassem 2 anos de prisão.

Nota-se, porém, que essa não seria a menor pena, porque ambos poderiam se negar e ficar com 1 ano cada, o que poderia acontecer se eles pudessem se comunicar. Mas, supondo um cenário em que o prisioneiro soubesse previamente a resposta do parceiro, mesmo que eles tivessem combinado de ambos negarem, a melhor resposta individual seria trair o parceiro, confessar e ficar livre.

Esse dilema pode ser aplicado em situações em que existe um conflito e que todos os jogadores podem ser prejudicados de alguma forma, o qual é o caso abordado nesse trabalho.

### 2.2.3 Equilíbrio de Nash

Equilíbrio de Nash originou-se através de seus criadores John Forbes Nash Junior e seus companheiros, Reinhard Selten e John Harsanyi, que revolucionaram várias áreas de conhecimento e ganharam diversos prêmios na área de Teoria dos Jogos devido aos seus estudos sobre a análise básica de equilíbrio na teoria dos jogos não-cooperativos.

Antes de apresentar com mais detalhes o Equilíbrio de Nash, é importante ressaltar que equilíbrio, nesse contexto, é o estado gerado devido a combinação das estratégias dos participantes do jogo.

Segundo a obra de Nash [33], o Equilíbrio de Nash surgiu através da análise da ausência de coalizões nas inter-relações formadas pelos participantes do jogo em que é assumido que cada jogador age independentemente sem colaboração ou comunicação com os outros.

É a generalização do conceito de solução de um jogo com 2 pessoas e do tipo soma não-zero em que o equilíbrio é simplesmente o conjunto de todos os pares opostos de “boas estratégias” e, por fim, é provado que um jogo finito e não-cooperativo sempre tem no mínimo um ponto de equilíbrio.

Segundo Rasmusen [32], estratégias de equilíbrio são aquelas nas quais os envolvidos no jogo tentam maximizar seus resultados individuais e, além de terem muito bem de-

finidos seus jogadores, estratégias e resultados, baseiam-se em possíveis combinações de estratégias.

O Equilíbrio de Nash é a combinação de estratégias ótimas de cada participante do jogo de modo que ao se atingir o equilíbrio de Nash, nenhum jogador sente a necessidade de sair desse equilíbrio considerando que os outros jogadores agirão da mesma forma [34].

No exemplo do Dilema dos Prisioneiros, o Equilíbrio de Nash seria que os dois confessem o crime, pois seria o melhor resultado individual para cada jogador.

## Batalha dos Sexos

Um exemplo de Equilíbrio de Nash foi proposto por Rasmusen em 1994, ao utilizar o jogo chamado de “Batalha dos Sexos” [32]. Suponha que haja um conflito entre o marido e sua mulher em que o marido prefere ir a uma luta de boxe enquanto a mulher prefere ir assistir *ballet*.

Embora egoístas, eles estão profundamente apaixonados e, se necessário, estariam dispostos a abdicarem suas preferências pessoais para permanecerem juntos.

Os resultados para os cenários seriam os seguintes: se eles fossem egoístas e cada um decidisse ir para seu lugar de preferência, nenhum ganharia, porque eles estariam separados. Da mesma forma que, supondo que houvesse um problema de comunicação, e o marido fosse para o *ballet* e a mulher para o boxe, também resultaria em nenhum ganho porque eles continuariam separados.

Para o cenário em que algum deles abdicasse sua preferência pessoal e cedesse à escolha do parceiro, teria o seguinte resultado: supondo que o marido optou pela preferência de sua esposa, o marido ganharia por estar na companhia de sua amada e a esposa ganharia mais ainda porque, além de estar na companhia do seu amado, poderia também assistir o *ballet* que ela tanto gostaria e, analogamente, se fosse o oposto.

A Tabela 2.2 mostra uma matriz de resultados do exemplo "Batalha dos Sexos".

Tabela 2.2: Matriz de Resultados - Batalha dos Sexos

		Mulher	
		Luta	Ballet
Homem	Luta	2,1	0,0
	Ballet	0,0	2,1

Para os cenários [0,0], os dois saem perdendo por estarem separados um do outro, entretanto, no caso [2,1], os dois ganham, mesmo que um ganhe mais que o outro. Logo, o equilíbrio de Nash consiste nos cenários com [2,1] em que ambos ganham.

Não há nenhuma ação unilateral por parte da esposa ou esposo que possa melhorar esse resultado, por exemplo, suponha que já esteja tudo combinado para eles irem ao

*ballet* e o esposo mude de ideia e vá ao boxe, dessa forma, os dois acabariam perdendo  $[0,0]$ , pelo menos é o que aconteceria do ponto de vista romântico.

Nesse exemplo da “Batalha de Sexos”, o parceiro que toma a atitude primeiro poderia ter vantagem. Suponha que o marido comprasse antecipadamente os ingressos da luta, poderia ser que seu comprometimento motivasse sua mulher a querer ir para o boxe, mas nem sempre o jogador com o primeiro movimento que possui a vantagem.

Logo, o Equilíbrio de Nash poderia ser definido como a combinação do melhor resultado individual de um jogador considerando a estratégia do outro jogador de forma que gere uma estabilidade que seria o caso  $[2,1]$  em que não há incentivo para mudança de comportamento, pois poderia resultar num cenário pior, o caso  $[0,0]$ .

## 2.2.4 Barganha de Nash

Barganha é uma negociação, uma transferência mútua, uma troca de favores, bens e privilégios. É quando dois envolvidos possuem um interesse em comum e negociam sobre ele.

Segundo Nash [35], uma situação de barganha entre duas pessoas envolve dois indivíduos que têm a oportunidade de colaborar para benefício mútuo em mais de uma maneira e, em seu trabalho, definiu que nenhuma ação tomada por um dos indivíduos sem o consentimento do outro poderia afetar o bem-estar do outro.

Para definir uma resposta para a barganha, precisa-se levar em consideração as preferências e o grau de contentamento por parte dos envolvidos.

É necessário assumir as seguintes premissas para os dois indivíduos que irão utilizar a Barganha de Nash [35]:

- São altamente racionais.
- Capazes de comparar com precisão suas preferências com outras opções.
- Possuem habilidade iguais de barganha.
- Possuem conhecimento completo de gostos e preferências um do outro.

A Barganha de Nash funciona da seguinte maneira, cada jogador escolhe suas preferências individuais, ou seja, preferências que supram suas demandas que serão chamadas de utilidade e escolhe também estratégias que serão aplicadas caso não haja nenhum acordo, isto é, caso suas demandas sejam incompatíveis.

Cada jogador informa um ao outro de suas decisões e o resultado será que haverá acordo caso cada jogador receba o que demandou, caso contrário, as estratégias para caso não haja acordo serão aplicadas.

Logo, foi definido que a solução para a barganha seria a maximização das diferenças entre as demandas dos jogadores e as estratégias para quando os jogadores não cooperam.

Matematicamente, pode ser expresso pela maximização da Equação 2.1 [36]:

$$(x_1 - a_1) \times (x_2 - a_2) \quad (2.1)$$

Em que  $x$  representa os valores de utilidade que podem ser alcançados quando é viável para o jogador 1 e jogador 2 cooperarem e  $a$  representa os valores quando os jogadores não cooperam.

E, através da Barganha de Nash, foram provados os quatro seguintes axiomas [36,37]:

1. **Invariância à respeito da preservação de transformações de utilidade:** a ordem que é feita as transformações lineares das utilidades não muda a solução.
2. **Simetria:** a solução não depende de qual jogador é chamado jogador 1, pois é uma função simétrica que vale para os dois, independente da ordem.
3. **Ótimo de Pareto:** os jogadores conseguem ter sucesso em cooperar com eficiência ótima.
4. **Independência de alternativas irrelevantes:** mesmo que se retire do conjunto das alternativas aquelas que são irrelevantes, a solução continua válida.

O conceito principal da Barganha de Nash é aplicada nesse trabalho para a negociação entre as companhias aéreas.

### 2.2.5 Teorema de *Folk*

Jogos que se repetem são diferentes de jogos que acontecem uma única vez, afinal o jogador pode planejar suas ações baseadas nas ações passadas de seu oponente.

O Teorema de *Folk* é uma abordagem da Teoria dos Jogos que considera o fator de punição para gerar várias combinações de resultados em jogos que se repetem infinitamente ou numa quantidade razoavelmente grande.

Por exemplo, considerando o Dilema dos Prisioneiros que a estratégia dominante é que os dois confessem, se essa situação acontecesse repetidas vezes, seria interessante do ponto de vista dos prisioneiros se eles cooperassem entre si e os dois decidissem se negar a testemunhar.

Se negar a testemunhar resultaria que cada um pegaria uma pena reduzida comparada a que os dois confessam. Nota-se que esse cenário é totalmente viável quando se considera a repetição no jogo, pois seria a melhor opção para os dois.

O Teorema de *Folk* pode ser definido como um jogo de  $n$ -participantes infinitamente repetido com conjuntos de ações finitas a cada repetição em que qualquer combinação de ações observadas em qualquer número finito de repetições é o único resultado de um perfeito equilíbrio em um dado sub jogo [32].

Pode ser considerado que, na versão infinitamente repetida do jogo, desde que os jogadores sejam suficientemente pacientes, há um Equilíbrio de Nash de tal forma que ambos os jogadores cooperam no caminho de equilíbrio, ou seja, o teorema sugere que qualquer resultado viável e individualmente racional é possível [38].

Se há uma quantidade de tempo infinita no jogo, então sempre há uma maneira de fazer um jogador querer punir outro jogador para um melhor futuro, mesmo que a punição atual prejudique tanto o que pune como o que é punido. Logo, qualquer intervalo de tempo finito é insignificante perto da eternidade, dessa forma, a ameaça de uma futura represália faz com que os jogadores estejam dispostos a suportar as punições necessárias [32].

Especificamente, sempre que qualquer jogador se desvia do caminho desejado de equilíbrio, esse jogador pode ser "punido" pelos outros jogadores trocando para o pior equilíbrio possível para o que desviou, independentemente da história do jogo a esse ponto [39].

Ambos jogadores podem trocar para estratégias que minimizam o máximo resultado de seu oponente após um desvio do equilíbrio por um específico número de períodos.

Os aspectos do Teorema de *Folk* em relação à repetição de jogos para aumentar e otimizar os resultados e o uso de punições serão utilizados nesta pesquisa com o propósito de gerar um Equilíbrio de Nash, ou seja, de obter o melhor resultado individual para os jogadores.



## Capítulo 3

# Gerenciamento do Tráfego Aéreo

O capítulo tem por objetivo abordar os principais assuntos e definições básicas relacionados ao tráfego aéreo para a melhor compreensão do contexto da pesquisa.

O Gerenciamento do Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management*) (ATM) não é uma tarefa simples, pois lida constantemente com o aumento do volume das aeronaves, alterações no planejamento dos voos e atrasos nas decolagens e aterrisagens.

O Gerenciamento do Tráfego Aéreo tem como propósito gerenciar de modo dinâmico e integrado o tráfego e o espaço aéreo devido a provisão de serviços contínuos e colaboração dos participantes envolvidos [40].

O ATM consiste em assegurar o cumprimento dos horários das aeronaves tanto de chegada como partida de acordo com planos de voos bem definidos e exigências operacionais de segurança garantidas [41]. É responsável por estipular direcionamentos, estratégias e normas para o uso do espaço aéreo considerando a demanda, topologia e infraestrutura [42].

### 3.1 Conceitos Gerais

O ATM é dividido em Serviços de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Services*) (ATS), Gerenciamento do Espaço Aéreo (*Air Space Management*) (ASM) e Gerenciamento do Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management*) (ATFM) [43].

O ATS visa controlar o tráfego aéreo com as atividades de controle de área, de aproximação e de aeroportos, além de serviços de informação de voo e de alerta [44].

O ASM foca em agir coordenadamente para garantir o uso eficiente do espaço aéreo e otimização da rede de rotas [45].

O ATFM auxilia para que o fluxo de tráfego aéreo seja mais seguro, organizado e eficaz, de forma que resulte em uma possibilidade de máxima extensão do tráfego aéreo, bem como um volume de tráfego aceitável, além de ser efetuado em três fases: [40].

- **Planejamento estratégico:** diz respeito às ações ocorridas com mais de um dia de antecedência à data em que estariam em vigor. Refere-se ao planejamento dos voos pelos órgãos responsáveis pelo tráfego aéreo e operadores de aeronaves considerando as demandas e capacidades.
- **Planejamento pré-tático:** diz respeito às ações ocorridas no dia anterior à data em que estariam em vigor. Refere-se a um planejamento mais preciso dos voos o qual considera dados meteorológicos, infraestrutura aeronáutica e aeroportuária e eventos especiais.
- **Operações táticas:** diz respeito às ações ocorridas no mesmo dia em que estariam em vigor. Refere-se ao acompanhamento de fatos inesperados que podem alterar a capacidade e/ou demanda e a tomada de providências atenuantes aos impactos.

Essa pesquisa aborda especificamente a área de gerenciamento de fluxo aéreo – ATFM com foco nas operações táticas, pois considerará a tomada de decisões para fatores imprevisíveis que exigirão mudanças nas rotas previamente planejadas para novas rotas.

## 3.2 Espaço Aéreo do Brasil

O espaço aéreo brasileiro compreende a área do território brasileiro de  $8.511.965 \text{ km}^2$  e a área oceânica que se expande até o meridiano  $10^\circ\text{W}$ , atingindo um total de 22 milhões de  $\text{km}^2$  [45].

### 3.2.1 Órgãos Responsáveis

Os órgão encarregados pelo tráfego aéreo brasileiro são [46]:

O Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA) é o órgão que tem a responsabilidade de controlar o espaço aéreo brasileiro, viabilizar os voos e organizar o fluxo de tráfego aéreo do Brasil por meio de serviços de navegação aérea. Utiliza-se de tecnologia, infraestrutura, recursos humanos e equipamentos para proporcionar fluidez e segurança dos voos.

O Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA) é uma unidade da DECEA responsável por manter o equilíbrio entre demanda e capacidade nos aeroportos e setores de controle. Atua de forma colaborativa com o auxílio de representantes de empresas aéreas, administradoras aeroportuárias e organizações reguladoras para organizar o fluxo aéreo e compartilhar informações e responsabilidades.

O Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA) é uma unidade subordinada ao DECEA, no qual é representado por quatro grandes bases que

controlam diariamente o tráfego aéreo. Possui cinco subdivisões de espaço aéreo e cada subdivisão é chamada de Região de Informação de Voo (*Flight Information Region*) (FIR), que são espaços aéreos de dimensões conhecidas que proporcionam serviços de informação de voo e alerta, as cinco subdivisões são ilustradas na Figura 3.1.

- **CINDACTA I (Brasília-DF):** Representa a região central do país e é encarregado pela FIR Brasília, que é a região amarela na Figura 3.1.
- **CINDACTA II (Curitiba-PR):** Representa o sul e parte do centro-sul do país e é encarregado pela FIR Curitiba, que é a região branca na Figura 3.1.
- **CINDACTA III (Recife-PE):** Representa o Nordeste e área sobrejacente ao Atlântico e é encarregado pelas FIR Recife, que é a região verde na Figura 3.1, e Atlântico, que é a região azul na Figura 3.1.
- **CINDACTA IV (Manaus-AM):** Representa grande parte da região amazônica e é encarregado pela FIR Manaus, que é a região cinza na Figura 3.1.

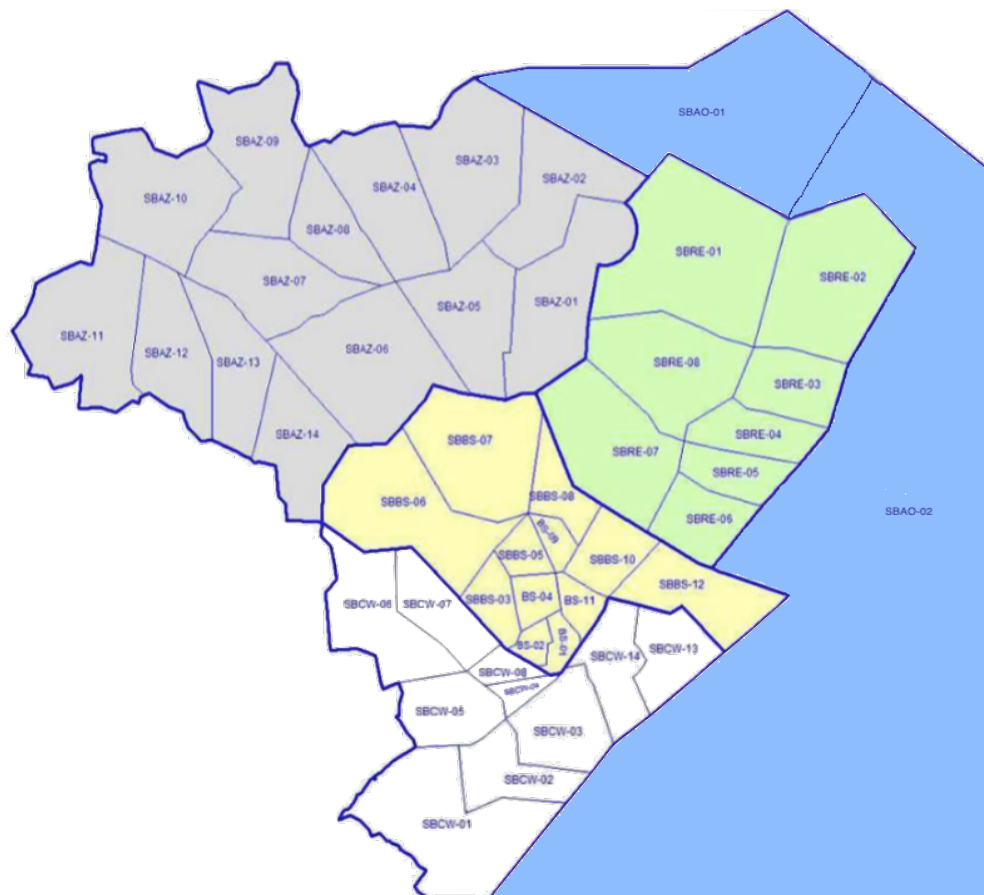


Figura 3.1: Divisão por Região de Informação de Voo (Adaptada) [4].

### 3.2.2 Aeroportos

Segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) [47], o Brasil tem cerca de 588 aeródromos públicos, sendo aeródromos áreas delimitadas por terra ou água destinados a chegada, partida e movimentação de aeronaves. Aeroportos são aeródromos públicos constituídos de instalações e facilidades para auxiliar as operações de aeronaves e de embarque e desembarque de pessoas e cargas [44].

Desses 588 aeródromos públicos, 49 aeródromos são considerados os principais aeroportos do Brasil como ilustra a Figura 3.2.



Figura 3.2: Aeroportos do Brasil [5].

Os três principais aeroportos com maior número de movimentações que incluem pousos, decolagens, cruzamentos e Toque e Arremetida (*Touch and Go Landing*) (TGL) são, respectivamente, Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos (SBGR), Aeroporto de São Paulo - Congonhas (SBSP) e Aeroporto Internacional de Brasília (SBBR) que juntos totalizaram cerca de 664.370 movimentações no ano de 2016 [48].

### 3.2.3 Serviços de Tráfego Aéreo

Os Serviços de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Services*) (ATS) consistem em serviços prestados em prol do tráfego aéreo que compreendem todo o espaço aéreo como: prover informações para os órgãos responsáveis, operadores e pilotos de forma que gere segurança e o suprimento necessário às atividades operacionais.

Podem ser representados pelos seguintes serviços [44]: serviço de controle de tráfego aéreo que contém o serviço de controle de área, serviço de controle de aproximação, serviço de controle de aeródromo e serviço de informação de voo.

Na prática, esses serviços são prestados por [49]:

- **Torre de Controle de Aeródromo (*Aerodrome Control Tower*) (TWR):** controla as aeronaves nas fases de manobra, decolagem, pouso ou sobrevoo de aeródromo. O TWR tem como principais objetivos impedir colisões com outras aeronaves ou qualquer tipo de obstáculo e tem como área de jurisdição o circuito de tráfego e a área de manobras do aeródromo.
- **Controle de Aproximação (*Approach Control Unit*) (APP):** controla as aeronaves que estejam chegando ou partindo do aeródromo. O APP visa a separação das aeronaves de outras aeronaves ou obstáculos e tem por área de jurisdição o espaço aéreo chamado de Área de Controle de Terminal (*Terminal Manoeuvring Area*) (TMA) ou Zona de Controle (*Control Terminal Region*) (CTR).
- **Centro de Controle de Área (*Area Control Centre*) (ACC):** controla as aeronaves que estão no voo em rota para assegurar a separação diante de possíveis obstáculos. Sua área de jurisdição é o espaço denominado Região de Informação de Voo (*Flight Information Region*) (FIR).

### 3.2.4 Fases do Voo

No início do século passado, a utilização do espaço aéreo era bem limitada comparada com o período atual já que os voos eram lentos e só podiam acontecer no período diurno, que era o turno com a maior visibilidade, dado que a instrumentação aeronáutica era feita usando critérios visuais [50].

Essa navegação baseada na visão é chamada de Regras de Voo Visual (*Visual Flight Rules*) (VFR) na qual cartas de navegação visual são seguidas. No entanto, com o avanço da tecnologia e dos instrumentos aeronáuticos, passou-se a utilizar Regras de Voo por Instrumentos (*Instrument Flight Rules*) (IFR) baseados em cartas de navegação por instrumentos de forma que pudessem ter voos com maior precisão de informações.

A maioria dos voos comerciais da atualidade adota IFR e um voo para ser executado passa por fases desde o seu planejamento até o pouso. A Figura 3.3 mostra as fases operacionais de um voo IFR que podem ser descritas como [51]:

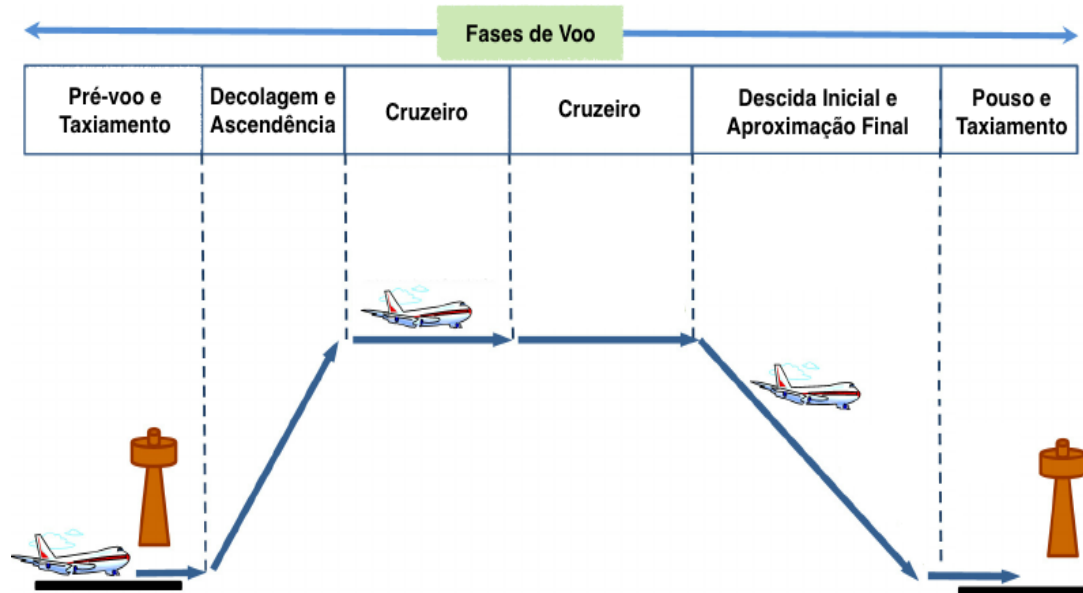


Figura 3.3: Fases de Voo (Adaptada) [6].

- **Fase pré-voo:** consiste no planejamento pré-tático e operações táticas.
- **Taxiamento:** quando a aeronave recebe autorização para se posicionar na pista de rolagem e acionar os motores, sendo que o piloto desloca a aeronave até a cabeceira da pista, enquanto espera a permissão para a decolagem.
- **Decolagem:** acontece quando a aeronave recebe autorização para decolagem pela TWR do aeródromo. Depois que deixa o solo e atinge uma dada altitude, a aeronave passa a ser controlada pelo APP que a guiará durante o procedimento de subida da TMA.
- **Ascendência:** a aeronave sobe até a altitude prevista no plano de voo e, ao alcançar a altitude especificada, tem-se a saída da TMA e a entrada na aerovia do plano de voo.
- **Cruzeiro:** corresponde ao ajuste da velocidade e altitude da aeronave, tendo como responsável o ACC.
- **Decida inicial:** a aeronave desce gradualmente até alcançar a TMA. Se houver congestionamento no terminal, a aeronave atrasa sua entrada na TMA, normalmente, voando em círculos.

- **Aproximação final:** ao chegar no terminal de destino, é controlada pelo APP e efetua o procedimento de descida até alcançar a pista de aterrissagem, sendo que para aterrissar é necessário a aprovação da TWR.
- **Taxiamento:** ao chegar na pista, a velocidade da aeronave é reduzida até a chegada ao portão de desembarque. Por fim, a equipe de controle de solo conduz a aeronave pelo pátio até sua parada completa e o desligamento dos motores.

### 3.2.5 Alocação de *Slots*

*Slot* é um horário estabelecido para que a aeronave faça uma operação de pouso ou decolagem [40].

Se o nível de saturação em um aeródromo público for considerado crítico para o uso dos componentes aeroportuários como pista, pátio, terminal ou ATS em determinado período de horas do dia, dias da semana ou época do ano, a ANAC tem o poder de declarar o aeródromo como coordenado [52].

Aeródromo coordenado é um aeródromo em que existe a possibilidade de que a demanda de tráfego aéreo ultrapasse a capacidade declarada, o que resulta em que todas as operações tanto de pouso como decolagem fiquem sujeitas à obtenção de um *slot* [40].

Nessa atual temporada, os aeroportos considerados coordenados pela ANAC são [53]:

- **Aeroportos Internacionais:** Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão (SBGL), Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos (SBGR), Aeroporto Internacional de Belo Horizonte - Confins (SBCF), Aeroporto Internacional de Brasília (SBBR) e Aeroporto Internacional de Viracopos - Campinas (SBKP).
- **Aeroportos Domésticos:** Aeroporto de São Paulo - Congonhas (SBSP), Aeroporto do Rio de Janeiro - Santos Dumont (SBRJ) e Aeroporto de Belo Horizonte - Pampulha (SBBH).

O CGNA, nesse caso de aeródromos coordenados, emitirá um Aviso aos Aeronavegantes (*Notice to Airmen*) (NOTAM), um aviso com informações relativas às condições da instalação aeronáutica e serviços para o pessoal encarregado das operações de voo [44], e permitirá o acesso aos *slots* disponíveis por meio do sistema Central Integrada de SLOT do CGNA (CIS).

O *slot* é válido a partir de 30 minutos antes até 30 minutos após o horário alocado, exceto em casos com situações adversas como condições meteorológicas impróprias; interrupção na prestação do ATS; interdição da infraestrutura aeroportuária; e aplicação de medidas de ATM [52].

O processo de alocação de *slots* é dividido nas seguintes etapas [54]:

1. **Publicação do calendário de atividades:** contém os prazos para os procedimentos de alocação de *slots* por temporada.
2. **Primeira etapa de coordenação:** processará solicitações com no mínimo 5 *slots* por companhia aérea, chamado de séries de *slots*.
3. **Segunda etapa de coordenação:** processa solicitações não relacionadas a séries de *slots*, sendo admissível requisição ou alterações nos *slots*, contanto que não altere a definição da Base de Referência (BDR) para o acompanhamento da série de *slots* da cada companhia aérea.
4. **Terceira etapa de coordenação:** monitoração das operações, sendo admissível requisição ou alterações nos *slots*, contanto que não altere a BDR.

Os *slots* são terminantemente proibidos de serem comercializados, porém eles podem ser cedidos entre as companhias aéreas através de validação da ANAC e caso não sejam utilizados retornam ao banco de *slots*.

### 3.2.6 Separação entre Aeronaves

As aeronaves ao se movimentarem fazem com que o ar atinja suas asas e, dessa forma, são gerados vórtices circulares pelo ar em deslocamento que aparecem devido a diferença de pressão nas asas, a qual a menor pressão fica na superfície superior e a maior pressão na superfície inferior, sendo o conjunto de vórtices chamado de esteira de turbulência [55].

As esteiras de turbulência podem causar balanço violento, perda de altura ou de velocidade de ascensão. Devem ser consideradas um grande perigo caso haja um encontro com vórtice na área em que uma aeronave se aproxima de outra, pois a aeronave que estiver atrás poderá ter uma situação instável com relação à velocidade, empuxo, altitude e tempo de reação [44].

Com o propósito de evitar os efeitos da esteira de turbulência, existe uma separação mínima entre as aeronaves que são baseadas nos seguintes categoria de pesos [44]:

- **PESADA (H):** aeronaves de peso máximo de decolagem de 136.000 kg (300.000 libras) ou mais.
- **MEDIA (M):** aeronaves de peso máximo de decolagem inferior a 136.000 kg (300.000 libras) e superior a 7000 kg ( 15.500 libras).
- **LEVE (L):** aeronaves de peso máximo de decolagem de 7000 kg (15.500 libras) ou menos.



Para aeronaves que efetuarem voos IFR e estiverem pousando serão aplicadas a separação mínima de 2 minutos para uma aeronave média atrás de uma aeronave pesada e 3 minutos para uma aeronave leve atrás de uma aeronave pesada ou média [44].

### 3.3 Tomada de Decisão Colaborativa - CDM

A Tomada de Decisão Colaborativa (*Collaborative Decision Making*) (CDM) surgiu nos Estados Unidos em 1993 quando a Administração Federal de Aviação dos EUA (*Federal Aviation Administration*) (FAA) através de um programa chamado FADE (*FAA Airlines Data Exchange*) realizou experimentos que provaram que companhias aéreas que compartilham informações operacionais em tempo real com a FAA poderiam melhorar o processo de tomada de decisão do gerenciamento de tráfego [56].

#### 3.3.1 Definições Gerais

Segundo Hoffman [56], o processo de CDM é definido como um esforço de aprimorar o gerenciamento do tráfego aéreo através de troca de informações, desenvolvimento de ferramentas para apoio e uma consciência compartilhada.

A partir do momento em que cada participante envolvido no processo do CDM se dispõe a colaborar, compartilhar responsabilidades, informações e recursos, possibilita que as decisões possam ser melhor estruturadas através da compreensão das preferências, limitações, previsões e situações em tempo real dos participantes envolvidos [45].

Para que o processo de CDM funcione, é preciso que as decisões sejam tomadas pelo participante com a melhor condição, que as decisões sejam informadas aos outros participantes, que os dados que forem divididos possam aperfeiçoar o planejamento e gerência do tráfego aéreo e que as informações relevantes sejam compartilhadas [7].

O processo de CDM tem sido usado tanto nos EUA como na Europa, sendo utilizado nos EUA para lidar com alta demanda de voos e condições meteorológicas ruins que podem diminuir a capacidade aeroportuária e na Europa para aumentar a previsibilidade das operações aeroportuárias.

#### 3.3.2 A-CDM

A Tomada de Decisão Colaborativa em Aeroportos (*Airport - Collaborative Decision Making*) (A-CDM) é o processo do CDM aplicado diretamente a aeroportos na qual tem a intenção de melhorar o ATFM nos aeroportos para que assim seja reduzido os atrasos, haja uma maior previsibilidade dos eventos e a otimização de recursos, além de permitir que os parceiros tomem suas decisões baseados na colaboração com outros parceiros [57].

A-CDM como mostra a Figura 3.4 possui um conjunto de dados em comum compartilhados com o controle de tráfego aéreo, operadores de aeronaves, assistência em terra (*ground handling*), operações do aeroporto e operações em rede (*Central Flow Management Unit* (CFMU)) que visa a tomada de importantes ações para que haja um gerenciamento eficiente do aeroporto.

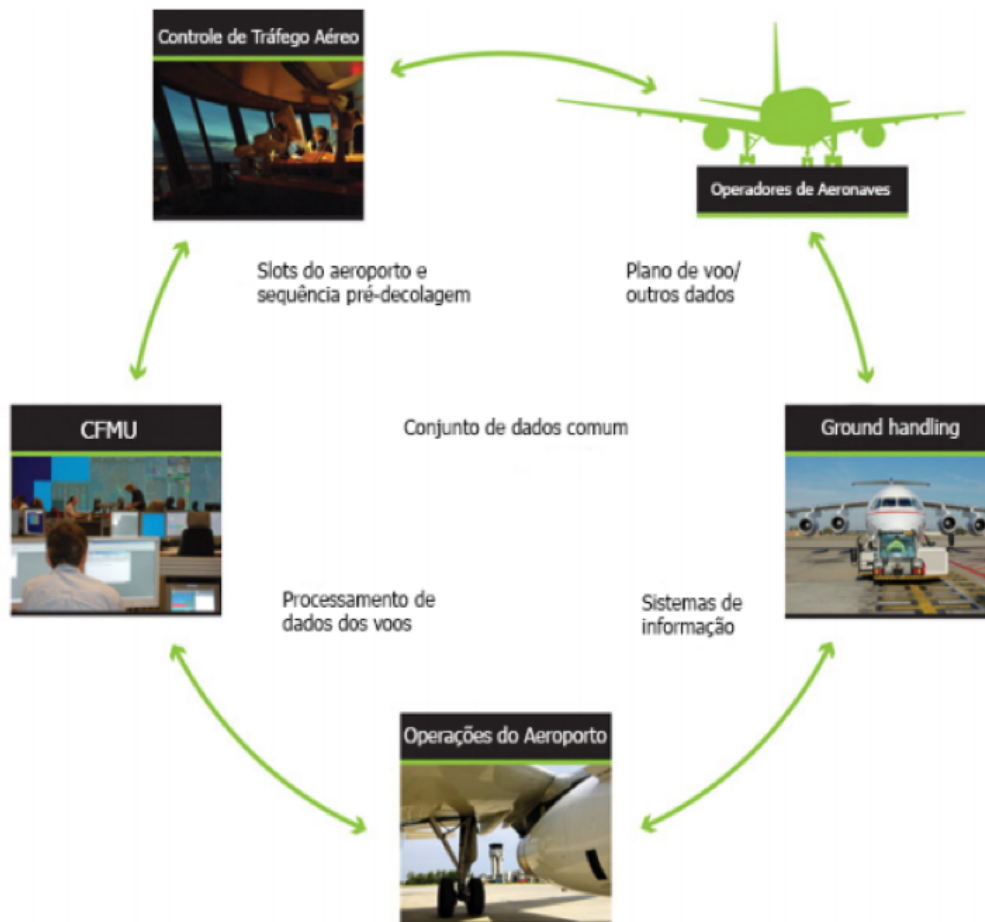


Figura 3.4: *Collaborative Decision Making* [7].

A-CDM pode ter a separação em quatro níveis [58]:

- **Primeiro nível:** consiste na instauração de uma consciência entre todos os envolvidos do cenário aeroportuário de forma que gere maior previsibilidade dos eventos, influenciando diretamente no planejamento pré-tático e tático. Tem como principais metas o compartilhamento de informações e o uso da abordagem com marcos de controle.

- **Segundo nível:** tem a atualização constante das informações o que resulta em um aumento da pontualidade e flexibilidade das operações através do acompanhamento do tráfego aéreo e o uso de recursos do aeródromo. Contêm a previsão dos horários de aterrissagem das aeronaves e o resultado do cálculo de tempo de taxiamento para a melhor eficácia do uso dos recursos do solo e para ordenação da fila de decolagens, além de ter o envolvimento com os órgãos de controle de fluxo.
- **Terceiro nível:** permite uma maior versatilidade das operações do aeródromo por meio do uso eficiente dos recursos. Em caso de situações adversas, os parceiros podem atuar de maneira colaborativa para distribuir os horários dos voos de modo a minimizar o impacto causado pela diminuição da capacidade aeroportuária.
- **Quarto nível:** considerado a melhoria dos níveis anteriores, pois incorpora inovações como tecnologia de transmissão de dados, monitoramento via satélite e radar, dentre outras, com o propósito de melhorar a comunicação, possibilitando o recebimento de dados em tempo real.

### 3.3.3 Aplicação

A aplicação do CDM pode ser vista através desses seis elementos [59]:

1. **Compartilhamento de informação:** envolvimento dos participantes no compartilhamento sobre os recursos de solo, torre de controle, órgãos ATC e informações das companhias aéreas.

Compartilhamento de informações é um conceito primordial para que o CDM funcione e as informações são referentes aos horários das companhias aéreas, informações operacionais de planejamento e de voos em progresso, mensagens que mostram o status atual, alertas, dados gravados e informações meteorológicas.

Elementos que podem facilitar que os parceiros compartilhem informação são uma plataforma que possa ser compartilhada entre os parceiros que contenha conjunto de dados com status e informações dos voos, formato padrão de transmissão de informação e dados, comunicação em tempo real e uso de sistemas semiautomáticos.

2. **Abordagem com marcos de controle:** uso de informações para a operação das aeronaves, taxiamento, momento do embarque e outros eventos significativos.

Possui como objetivos determinar eventos significantes para acompanhar os voos, definir informações atualizadas como novos parâmetros, estimativas e notificações, especificar a qualidade dos dados em termos de acurácia, período de tempo, confiabilidade, estabilidade e previsibilidade, garantir a ligação entre decolagem e aterris-

sagem dos voos, permitir decisões antecipadas em casos de interrupção de eventos e melhorar a qualidade das informações.

Os principais requisitos para sua aplicação são ter uma infraestrutura técnica e um lugar para compartilhar as informações que funcione apropriadamente, ter um consenso em que processos são necessários para melhorar a previsibilidade dos eventos e exibir de forma apropriada os resultados gerados pelos marcos de controle.

3. **Variação do tempo de taxiamento:** controle do tempo de todas as etapas da aeronave desde a aterrissagem até o pouso.

A finalidade é controlar os tempos estimados de aterrissagem e decolagem das aeronaves, os tempos calculados para alocação de *slots* e tempo para separação mínima entre as aeronaves. Além disso, para acompanhar a situação do tráfego, os parâmetros de tempo de taxiamento podem ser ajustados para segurar ou liberar aeronaves e podem ser usados equipamentos como radares ou até mesmo informação dos controladores de voos para estimar valores mais realísticos de taxiamento.

A aplicação está em estimar tempos precisos para o taxiamento que podem ser feitos considerando os seguintes atributos: o tempo atual de taxiamento padrão, informação de agentes operacionais especializados, tipos e categorias de aeronave, média de tempo de taxiamento baseado em dados históricos, tempo específico de taxiamento baseado em condições operacionais e informações baseadas na pista em uso.

4. **Sequenciamento prévio de decolagens:** normalmente é a formação de uma fila na ordem Primeiro a Chegar, Primeiro a Sair (*First In, First Out*) (FIFO) para efetuar a decolagem, utilizando os planos de voos, porém tem-se usado também o sequenciamento provido pelo ATC.

Os principais objetivos são melhorar a transparência das sequências, a previsibilidade e a pontualidade.

Para que sua aplicação seja bem-sucedida, é necessário utilizar as informações do CDM como, por exemplo, as previsões e preferências dos parceiros, além da troca de mensagens e conhecimento da situação atual e de possíveis restrições para que possa haver o melhor sequenciamento das decolagens.

5. **Condições adversas:** identificação, por exemplo, de condições climáticas desfavoráveis como tempestade e neblina, além de acidentes com aeronaves.

Muitos eventos planejados ou não podem afetar a operação normal de um aeroporto e reduzir sua capacidade. Condições adversas como condições climáticas e incidentes

com aeronaves não podem ser previstos com relativa acurácia, mas ambos dos seus escopos e possíveis efeitos podem ser previsíveis.

A aplicação do CDM nesse caso deve estar unida com todos os elementos já citados anteriormente. Deve-se preparar um plano para casos como esses com procedimentos e ações, sendo que devem ser simples e próximos de procedimentos que seriam utilizados em situações normais, além de garantir que todos os parceiros em todos níveis sejam familiares com esses procedimentos e designar um responsável para coordenar as atividades.

**6. Gerenciamento colaborativo de informações dos voos atualizados:** conhecimento e uso das informações acessíveis.

O objetivo é permitir a pontualidade e eficiência dos voos considerando os recursos disponíveis com ênfase na otimização da capacidade.

Sua aplicação está em garantir a integridade da informação entre operações do aeroporto, melhorar a previsibilidade de operações em solo, melhorar a estimativa dos tempos de decolagem.

Este trabalho atuará diretamente na área de condições adversas.

### **3.4 Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo - CTOP**

O Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*) (CTOP) é uma iniciativa que surgiu nos Estados Unidos em 2012 criada pela FAA para gerenciar a demanda do fluxo de tráfego aéreo de uma área restrita [60]. A área restrita é uma área em que a capacidade do fluxo é reduzida de modo que parte dos voos não utilizam suas rotas mais viáveis e possuem atrasos devido a condições adversas como, por exemplo, situações climáticas desfavoráveis como tempestades e grandes volumes de fluxo aéreo.

Essa área restrita pode ser representada por uma ou mais e é chamada de Área Restrita de Fluxo (*Flow Constraint Area*) (FCA). A ideia é que para cada FCA seja definida capacidade e horários dos voos e que as companhias aéreas possam escolher um horário na FCA ou voar por fora dela de forma que possa reduzir o atraso causado pelas limitações das áreas.

A Figura 3.5 mostra 2 FCA's que estariam no caminho entre os voos do Aeroporto Internacional Dallas/Fort Worth (DFW) e do Aeroporto Internacional John F. Kennedy

(JFK), sendo que as possíveis rotas seriam: ir pela *FCA001*, ir pela *FCA002* ou voar por fora das FCA's.

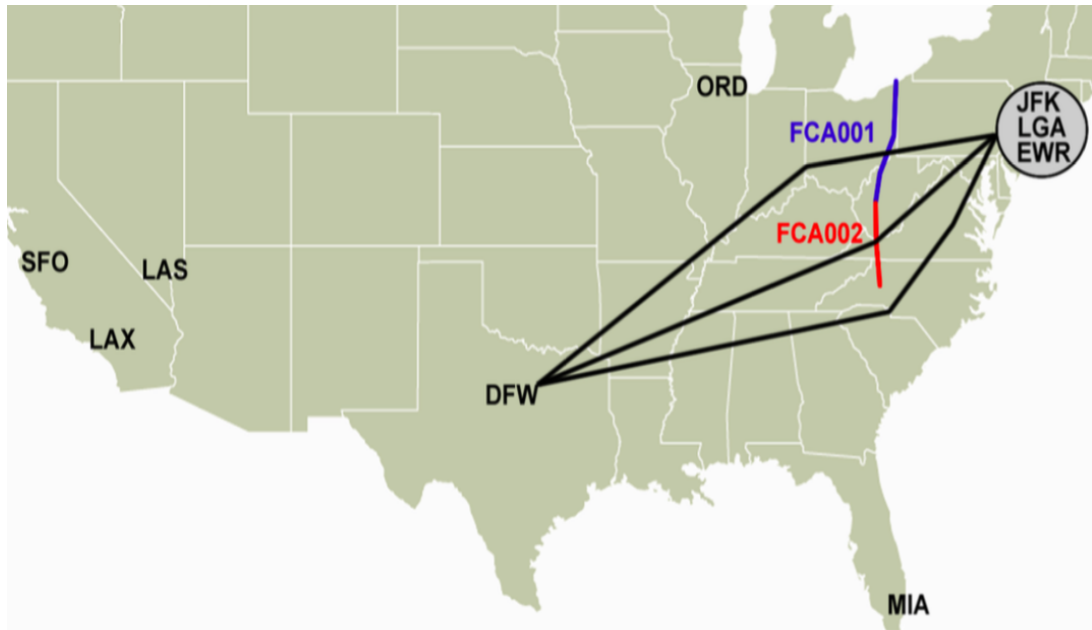


Figura 3.5: Exemplo de FCA's [8].

O CTOP usa o conceito de CDM ao propor a negociação e colaboração entre as companhias aéreas e controladores de voos para tentar minimizar os impactos ocasionados pelas restrições. As companhias aéreas podem manifestar suas preferências de rotas e horários através do Conjunto de Opções de Trajetória (*Trajectory Options Set*) (TOS) que será abordado em detalhes na seção seguinte.

Vale ressaltar que o CTOP é aplicado somente aos voos que tem a intenção de passar na área de restrição.

As principais características do CTOP são [61]:

- A FAA decide quais são as restrições do espaço aéreo e a quantidade de voos permitidos nas áreas selecionadas.
- Os controladores de voo enviam mensagens para a FAA com as opções de rotas e suas preferências de rotas e atrasos.
- A FAA seleciona para cada voo a rota e atraso segundo a preferência dos controladores de voo de acordo com a viabilidade de cada voo em relação a restrição e o tráfego.
- A FAA informa aos controladores de voo das rotas e atrasos atribuídos.

- Conforme as mudanças das condições, a FAA pode mudar as rotas e atrasos que anteriormente foram atribuídas.
- Os controladores de voo podem mandar a qualquer momento suas preferências.
- Decisões de rotas e atrasos são realizadas através de automação ao invés do ser humano tomar as decisões, o que permite uma solução mais afinada ao problema de congestionamento já que leva em consideração as condições de cada voo.

### 3.4.1 Conjunto de Opções de Trajetória - TOS

O Conjunto de Opções de Trajetória (*Trajectory Options Set*) (TOS) contém uma mensagem eletrônica a qual permite as companhias aéreas escolherem as rotas desejadas e opções de atraso que estão dispostas a aceitar para cada voo, além de poder ter outros dados como altitude e velocidade [62].

O CTOP funciona da seguinte maneira, cada companhia aérea manda seu TOS dos voos que participarão do CTOP para a FAA que utiliza um algoritmo para atribuir as opções dadas ao conjunto de *slots* disponíveis.

O algoritmo verifica as trajetórias com os menores tempos para entrarem nas FCA's chamados de *Early Arrival Time* (EAT) e, dentre os dois valores de EAT, seleciona-se o menor valor que é chamado de *Initial Arrival Time* (IAT). Ordena-se o voos por IAT e atribui-se os *slots* com menores tempos de atraso para os voos.

Além disso, as companhias aéreas podem ter voos de exceção que são voos que já estavam em rota quando o CTOP foi executado, normalmente voos internacionais, que por já estarem voando, recebem a preferência de serem alocados primeiro e só depois os demais voos.

Por exemplo, suponha que haja 2 FCA's, FCA1 e FCA2, e que o CTOP tenha capturado 4 voos e seus horários de EAT sejam como mostra a Tabela 3.1 a seguir:

Tabela 3.1: Exemplo de EAT

Nº do Voo	Companhia Aérea	EAT da FCA1	EAT da FCA2	Tipo de Voo
1	CompanhiaX	17:00	17:05	Normal
2	CompanhiaX	17:01	17:03	Exceção
3	CompanhiaX	17:05	17:04	Normal
4	CompanhiaY	17:03	17:05	Normal

A tabela com os *slots* disponíveis nas FCA's encontra-se na Tabela 3.2.

Inicialmente, atribui-se o voo de exceção ao *slot* com menor tempo de atraso, nesse caso, o voo de nº 2 é atribuído ao *slot* 17:03 da FCA2.

Tabela 3.2: Exemplo de *Slots* Disponíveis nas FCA's

<b>FCA1</b>	<b>FCA2</b>
17:00	17:01
17:02	17:03
17:06	17:05

Para atribuir os demais voos, é necessário ordená-los por *IAT* como mostra a Tabela 3.3 a seguir:

Tabela 3.3: Exemplo de *IAT*

<b>Número do Voo</b>	<b>Companhia Aérea</b>	<b>IAT</b>	<b>FCA</b>
1	CompanhiaX	17:00	FCA1
4	CompanhiaY	17:03	FCA1
3	CompanhiaX	17:04	FCA2

Após a ordenação, utiliza-se essa ordem para atribuir os *slots* disponíveis e que gerem o menor atraso. Nesse caso, o voo de nº 1 teria o *slot* das 17:00 da FCA1 com nenhum atraso, o voo nº 4 teria o *slot* das 17:05 da FCA2 com nenhum de atraso e o voo nº 3 teria o *slot* das 17:06 da FCA1 com 1 minuto de atraso como mostra a Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Exemplo de Alocação Final do CTOP

<b>Nº do Voo</b>	<b>Companhia Aérea</b>	<b>Slot</b>	<b>FCA</b>	<b>Atraso (minutos)</b>
1	CompanhiaX	17:00	FCA1	0
2	CompanhiaX	17:03	FCA2	0
4	CompanhiaY	17:05	FCA2	0
3	CompanhiaX	17:06	FCA1	1

Essa ordem final tem por objetivo minimizar os custos e atrasos ao ordenar os voos por seus menores horários disponíveis.

Segundo Golibersuch [63], o algoritmo do CTOP pode ser simplificado em 6 etapas:

1. Decidir os voos que participarão do CTOP.
2. Decidir quais voos são considerados exceções.
3. Vincular trajetórias para os voos de exceção.
4. Ordenar os voos que restarem segundo o *IAT* de cada voo.
5. Associar a rota para cada voo conforme a ordem de *IAT* e capacidade disponível.
6. Enviar a lista final para cada companhia aérea



A Figura 3.6 mostra um TOS de um voo do Aeroporto Internacional Chicago O'Hare (ORD) para o Aeroporto LaGuardia (LGA) com suas possíveis rotas, altitude, velocidade, *Relative Trajectory Cost* (RTC) que é o máximo de tempo de atraso aceito por aquele voo, *Trajectory Valid Start Time* (TVST), *Trajectory Valid End Time* (TVET) que definem o período de validade da rota e *Required Minimum Notification Time* (RMNT), tempo mínimo para que a FAA avise a companhia aérea sobre a alocação dessa rota.

Route	Altitude	Speed	Relative Trajectory Cost (RTC)	Trajectory Valid Start Time (TVST)	Trajectory Valid End Time (TVET)	Required Minimum Notification Time (RMNT)
ORD..ELX..JHW.. ..RKA..LGA	350	480	0	13:00	-	-
ORD..ELX..JHW.. ..RKA..LGA	370	480	10	13:00	15:00	-
ORD..TVC..RKA.. ..IGN..LGA	350	480	20	13:00	16:00	45
ORD..TVC..RKA.. ..IGN..LGA	370	480	25	13:00	15:50	45
ORD..ASP..YYZ..ROC.. ..RKA..IGN..LGA	350	480	40	13:00	16:00	-
ORD..ASP..YYZ..ROC.. ..RKA..IGN..LGA	370	480	45	13:00	15:00	-

Figura 3.6: Exemplo de TOS [9].

Cada companhia aérea ao mandar seu TOS para a FAA não tem conhecimento da quantidade de voos capturados pelo CTOP, dessa forma, as companhias precisam escolher de maneira inteligente as opções que serão mandadas de maneira que possam contemplar a redução de seus atrasos e a atenuação de seus riscos.

Por fim, a FAA que toma a decisão final baseada nas preferências de cada TOS e do resultado do CTOP.

### 3.4.2 Aplicação

Uma aplicação direta do CTOP foi gerada por Miller e Hall [10]. A abordagem consiste no seguinte cenário, os voos já tinham os horários de seus *slots* planejados, porém, quando faltavam 2 horas para a execução dos planos de voos recebeu-se a notícia que as condições climáticas afetariam a distribuição dos voos.

Dessa forma, o órgão responsável pelo tráfego aéreo definiu uma FCA na área que seria afetada por essas condições climáticas e que abrangesse o período que esse evento aconteceria que é mostrada na Figura 3.7.



Figura 3.7: Interface Gráfica com a FCA (Adaptada) [10].

Então, foi definido que a capacidade do CTOP seria de 5 aeronaves por hora e que se iniciaria às 9:00 horas e terminaria às 14:00 horas, e a partir dessas condições, executou-se o CTOP.

A Figura 3.8 mostra a alocação dos voos pelo CTOP em que eles estão ordenados pelo tempo original de entrada na FCA. Analisando a imagem, observa-se em vermelho que apenas os cinco primeiros voos serão alocados sem nenhum atraso, enquanto os outros tem mais de 40 minutos de atraso.

Trajectory Options - JBU300 MCO -> ATL (6 results)										
Acid	Origin	Dest	Igtd	Edct	Status	Fled	Delay	FCA time	Orig FCA time	Route
Status : impacted										
JBU300	MCO	ATL	2013-07-30T10:00:0...		impacted		0	11:10	11:10	MCO OCF ATL
JBU27	EWB	MCO	2013-07-30T09:20:0...		impacted		0	11:11	11:11	EWB BIGGY COPES ...
JBU583	JFK	MCO	2013-07-30T09:19:0...		impacted		0	11:12	11:12	JFK RBV COPES CS...
JBU1099	LGA	MCO	2013-07-30T09:20:0...		impacted		0	11:13	11:13	LGA BIGGY COPES C...
JBU723	DCA	MCO	2013-07-30T09:48:0...		impacted		0	11:14	11:14	DCA AML CSN MOL ...
JBU1895	HPN	MCO	2013-07-30T09:20:0...		impacted		45	12:00	11:15	HPN BIGGY COPES ...
JBU683	JFK	MCO	2013-07-30T09:23:0...		impacted		44	12:00	11:16	JFK RBV COPES CS...
JBU510	JFK	MCO	2013-07-30T09:24:0...		impacted		43	12:00	11:17	JFK RBV COPES CS...
JBU445	SWF	MCO	2013-07-30T09:22:0...		impacted		42	12:00	11:18	SWF HUO HOPCE S...
JBU509	DCA	MCO	2013-07-30T09:53:0...		impacted		41	12:00	11:19	DCA AML CSN MOL ...
JBU400	MCO	ATL	2013-07-30T10:10:0...		impacted		100	13:00	11:20	MCO OCF ATL
JBU800	MCO	ATL	2013-07-30T11:00:0...		impacted		50	13:00	12:10	MCO OCF ATL

Figura 3.8: Interface Gráfica com CTOP (Adaptada) [10].

Miller e Hall [10], fazem referência ao voo JBU400 do Aeroporto Internacional de Orlando (MCO) para o Aeroporto Internacional de Atlanta (ATL) em que seu atraso pelo CTOP chega a 100 minutos e é mostrado em preto na Figura 3.8.

Por esse ser um voo de conexão importante para a companhia aérea, opta-se por mandar um TOS que escolhe não passar pela FCA, mas passar em volta dela, gerando um gasto adicional de combustível.

A Figura 3.9 mostra as rotas finais atribuídas aos voos e a Figura 3.10 ilustra a alocação final dos voos com o voo JBU400 destacado em vermelho.

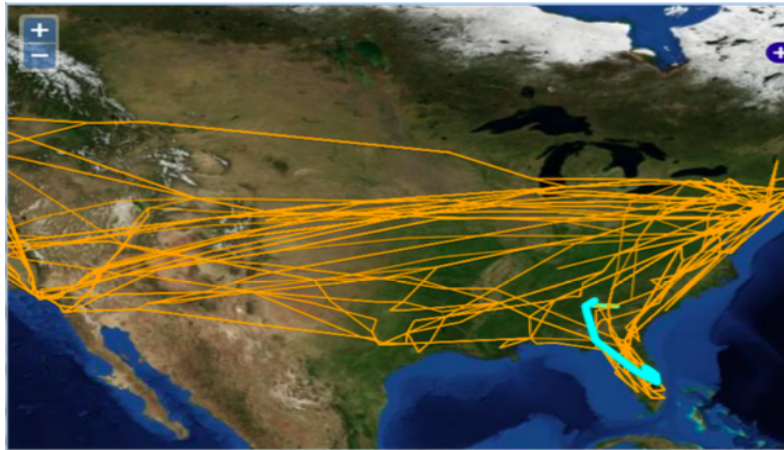


Figura 3.9: Interface Gráfica com as Rotas dos Voos Atribuídas (Adaptada) [10].

Trajectory Options - JBU400 MCO -> ATL (6 results)										
Acid	Origin	Dest	Igtd	Edct	Status	Fled	Delay	FCA time	Orig FCA time	Route
Status : assigned										
JBU400	MCO	ATL	2013-07-30T10:10:0...	2013-07-30T10:25:0...	assigned		0			MCO DEARY TPSTR ...
JBU300	MCO	ATL	2013-07-30T10:00:0...	2013-07-30T10:15:0...	assigned		0	11:10	11:10	MCO OCF ATL
JBU27	EWB	MCO	2013-07-30T09:20:0...	2013-07-30T09:35:0...	assigned		0	11:11	11:11	EWB BIGGY COPES ...
JBU583	JFK	MCO	2013-07-30T09:19:0...	2013-07-30T09:34:0...	assigned		0	11:12	11:12	JFK RBV COPES CS...
JBU1099	LGA	MCO	2013-07-30T09:20:0...	2013-07-30T09:35:0...	assigned		0	11:13	11:13	LGA BIGGY COPES C...
JBU723	DCA	MCO	2013-07-30T09:48:0...	2013-07-30T10:03:0...	assigned		0	11:14	11:14	DCA AML CSN MOL ...
JBU1895	HPN	MCO	2013-07-30T09:20:0...	2013-07-30T10:20:0...	assigned		45	12:00	11:15	HPN BIGGY COPES ...
JBU683	JFK	MCO	2013-07-30T09:23:0...	2013-07-30T10:22:0...	assigned		44	12:00	11:16	JFK RBV COPES CS...
JBU510	JFK	MCO	2013-07-30T09:24:0...	2013-07-30T10:22:0...	assigned		43	12:00	11:17	JFK RBV COPES CS...
JBU445	SWF	MCO	2013-07-30T09:22:0...	2013-07-30T10:19:0...	assigned		42	12:00	11:18	SWF HUO HOPCE S...
JBU509	DCA	MCO	2013-07-30T09:53:0...	2013-07-30T10:49:0...	assigned		41	12:00	11:19	DCA AML CSN MOL ...
Status : impacted										
JBU800	MCO	ATL	2013-07-30T11:00:0...		impacted		50	13:00	12:10	MCO OCF ATL

Figura 3.10: Alocação Final dos Voos (Adaptada) [10].

Esse cenário mostra como condições adversas podem mudar completamente a organização do tráfego aéreo. Portanto, é necessário ter informações em tempo real para que elas possam ser compartilhadas para todos os envolvidos, além de informar as companhias aéreas dessas condições e tomar atitudes eficientes para minimizar os possíveis impactos como definir a FCA e executar o CTOP.

### 3.4.3 CTOP no Brasil

Como foi dito no início dessa seção, o CTOP é um programa para atuar na colaboração de rotas e diminuição de atrasos em casos de áreas de fluxo restrito em que as companhias aéreas podem participar através da negociação de suas preferências. No entanto, não existe iniciativa semelhante ao CTOP implementada no cenário atual do Brasil.

A Figura 3.11 mostra a rota de um voo do Aeroporto de Aracaju - Santa Maria (SBAR) para o Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos (SBGR) e as linhas azuis representam outras rotas.

Observa-se na Figura 3.11 que não existem muitas rotas para um aeroporto, tem-se uma quantidade pequena e limitada de rotas, o que difere dos EUA, por exemplo, em que na Figura 3.9 as linhas amarelas indicam as rotas para apenas uma região.



Figura 3.11: Rota de SBAR para SBGR [11].

Diante das limitações da quantidade de rotas, as companhias aéreas acabam não tendo muitas opções e precisam dividir entre si os horários para as aeronaves passarem por essas rotas.

Se o modelo do CTOP fosse implementado no Brasil, haveria a necessidade de criação ou adaptação das rotas, entretanto, poderia gerar uma melhor eficiência do tráfego aéreo brasileiro, pois teria uma melhor distribuição dos voos e uma solução para lidar com áreas restritas por condições imprevisíveis.

O bom funcionamento do tráfego aéreo depende de muitos fatores e situações adversas como condições climáticas desfavoráveis, imprevistos em aeroportos, acidentes com aeronaves e fluxo intenso devem ser consideradas no planejamento aéreo, pois seus impactos podem gerar atrasos demasiadamente grandes ou até mesmo impedir as aeronaves de voarem.

No Brasil, existe um programa chamado SIRIUS da DECEA que tem por objetivo utilizar soluções de alta tecnologia, capacitação de recursos humanos e promoção da redução dos custos operacionais para promover a evolução do ATM do Brasil [64].

Considerando apenas a área de gerenciamento de tráfego aéreo, o programa SIRIUS já possui os seguintes empreendimentos [64]:

- **Redimensionamento das Áreas Superiores de Controle e Regiões de Informação de Voo (UTA/FIR):** visa a redistribuição do tráfego aéreo entre as FIR's e Regiões de Informação Superior (UIR) para a melhor distribuição do espaço aéreo com redução da complexidade e aumento na eficiência dos voos.
- **Implementação Operacional PBN em Área de Controle Terminal e Otimização de Rotas:** que através do conceito de Navegação Baseada em Performance (PBN) e uso de rotas mais diretas, pretende-se reestruturar as TMA's, implantar novas rotas, melhorar a integração do planejamento do espaço aéreo e minimizar efeitos prejudiciais ao meio ambiente.
- **Uso Flexível do Espaço Aéreo – FUA:** propõe a flexibilização, otimização e equilíbrio do espaço aéreo por meio da coordenação entre todos os envolvidos para reduzir consumo do combustível e de emissão de gás carbônico, além de aumentar a capacidade e eficiência do uso do espaço aéreo.
- **Implementação de Gerenciamento do Fluxo de Tráfego Aéreo – AFTM:** refere-se à implantação de ferramentas, sistemas e procedimentos para o uso eficiente do sistema de AFTM que possa resultar em redução de esperas por condições meteorológicas e por congestionamento, diminuição de atrasos e balanceamento entre demanda e capacidade.



- **Evolução do Serviço de Informação de Voo:** voltado para a reestruturação do espaço aéreo com a implantação da infraestrutura necessária para se ter melhorias nos serviços de informação de voo e de alerta que reflitam em um aumento da segurança operacional e eficiência nas operações de Busca e Salvamento.

Como pode-se observar, existem muitos objetivos em comum do programa SIRIUS com o CTOP como criação de rotas, colaboração entre os envolvidos no tráfego aéreo, redução de atrasos e de forma geral a melhoria do ATM.

Portanto, assim como já existe no cenário atual do Brasil propostas com alvos semelhantes ao CTOP, essa pesquisa tem por finalidade mostrar a aplicação do Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*) (CTOP) adaptada ao contexto do cenário aéreo brasileiro.

# Capítulo 4

## Estado da Arte

### 4.1 Alocação de *Slots* com CDM e Teoria de Jogos

Existem vários trabalhos na área de gerenciamento do tráfego aéreo, esta solução que será introduzida nesta seção foi escolhida para ilustrar os conceitos à respeito do CDM, alocação de *slots*, Teoria dos Jogos e aplicação ao cenário brasileiro de aviação.

Em 2013, Ribeiro desenvolveu um modelo para tratar do sequenciamento de partidas em aeroportos brasileiros utilizando Teoria dos Jogos e CDM que foi atribuído o nome de Gerenciamento Colaborativo de Partidas (CoDMAN) [12].

No cenário da aviação, toda aeronave que irá decolar deseja obter o melhor *slot* para efetuar seu voo, caracterizando um cenário não-cooperativo e suscetível à aplicação de Teoria dos Jogos.

Esse modelo foi criado para que se distribuísse da melhor forma possível os *slots* entre as aeronaves considerando que os participantes tivessem conhecimento, além de si próprios, dos demais participantes devido ao compartilhamento de informações que o CDM permite.

Essa abordagem utilizou como entrada o conjunto de voos ativos de um aeroporto e as aeronaves, além da capacidade do aeroporto quanto às pistas de rolagem, às posições de estacionamento, custo total de atrasos e capacidade de aterrissagens e decolagens.

O modelo consistiu em formar inicialmente uma fila de *slots* alocando as aeronaves na ordem Primeiro a Chegar, Primeiro a Sair (*First In, First Out*) (FIFO). Se uma aeronave quisesse ocupar uma posição que já estivesse ocupada por outra, teria que forçar a sua inserção na fila e consequentemente refletiria no aumento do atraso de alguns ou todos os voos. A Figura 4.1 mostra essa situação.

Para evitar conflitos entre as aeronaves foi proposto que houvesse uma negociação colaborativa de forma a reduzir os custos dos atrasos globais, ou seja, a totalidade dos

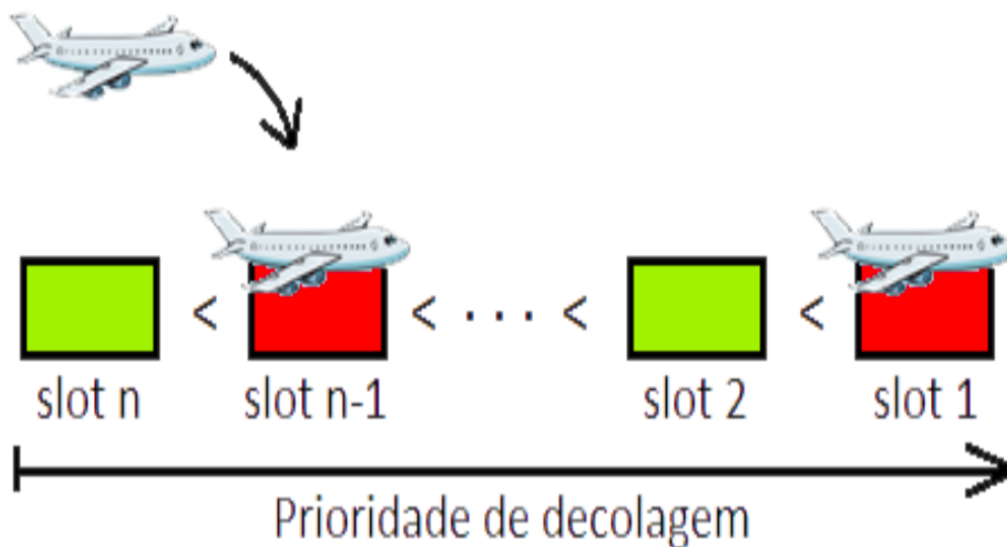


Figura 4.1: Conflito entre Duas Aeronaves na Tentativa de Ocupação de um *Slot* [12].

atrasos e os atrasos individuais de cada aeronave. Foram estabelecidas as seguintes opções de negociação que a aeronave poderia escolher:

- Tentar conseguir o *slot* seguinte resultando em ganhar uma posição na fila.
- Dar seu *slot* para outra aeronave resultando em perder uma posição na fila.
- Continuar com seu *slot*.

O algoritmo se resumiu a percorrer a fila de *slots* a partir do horário que as aeronaves tivessem seu horários de decolagem mais próximos ao horário atual da fila.

Se a aeronave quisesse negociar, teria que propor uma oferta para a aeronave à sua frente na fila. Se a proposta fosse aceita, realizaria-se a oferta e avançaria para a próxima aeronave da fila, senão os parâmetros de negociação seriam atualizados e a aeronave oponente enviaria uma nova oferta.

Se fosse aceita a oferta, avançaria-se para a próxima aeronave, senão uma nova oferta seria realizada e continuaria nesse ciclo até que se alcançasse o máximo de rodadas definido ou alguma aeronave aceitasse a proposta.

No caso em que a aeronave não quisesse negociar, avançaria-se para próxima aeronave da fila e no caso em que não houvesse nenhuma negociação, o aeroporto que ficaria com a responsabilidade de definir qual oferta seria aplicada.

Esse algoritmo descrito pode ser visualizado na Figura 4.2.



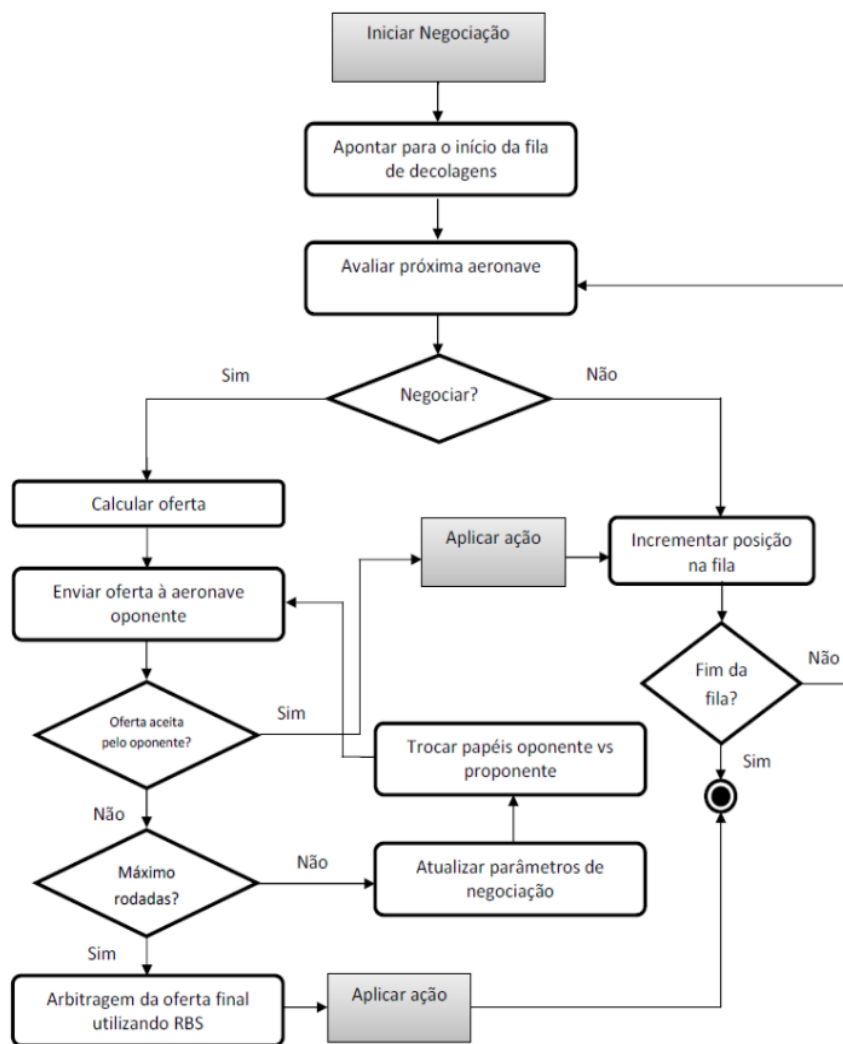


Figura 4.2: Processo de Percorrimento da Fila de Decolagens para Negociação [12].

Os parâmetros de negociação citados no algoritmo referem-se à uma medida de recompensa em que se a aeronave aceitasse a oferta, seria recompensada positivamente e se rejeitasse, seria recompensada negativamente de modo a incentivar a colaboração dos envolvidos.

Esse modelo foi simulado utilizando 202 aeronaves que decolaram do Aeroporto Internacional de Brasília (SBBR) e a Tabela 4.1 mostra o Resultado de Desempenho da Fila Antes e Depois da Negociação.

Após a aplicação do algoritmo, aumentou-se um voo fora do horário, obteve-se a diminuição do atraso total de 73 minutos para 61 minutos e diminuição do custo médio por aeronave, do desvio-padrão dos atrasos e custos e do custo total dos atrasos.

Tabela 4.1: Resultado de Desempenho da Fila Antes e Depois da Negociação [12]

Atributo	Antes	Depois
Voos fora do horário	35	36
Atraso médio por aeronave atrasada	2.09 minutos	1.69 minutos
Custo médio por aeronave atrasada	17.779	14.3916
Atraso total	73 minutos	61 minutos
Desvio-padrão dos atrasos	0.92133	0.915807
Desvio-padrão dos custos de atraso	8.10712	7.26957
Custo total dos atrasos para o cenário	622.267	518.097

Logo, essa abordagem apresentou resultados satisfatórios no contexto brasileiro e mostrou como a utilização do CDM aliado a Teoria dos Jogos pôde contribuir na redução dos atrasos das aeronaves.

## 4.2 Alocação de *Slots* com Algoritmo *Greedy* no CTOP

Para lidar com a otimização da alocação de voos por parte das companhias aéreas utilizando o CTOP, um modelo foi proposto por Bosung e Clarke em 2014 que utilizava o algoritmo de busca *greedy* [9].

O modelo consistiu em definir o Conjunto de Opções de Trajetória (*Trajectory Options Set*) (TOS) mais apropriado para cada voo de uma companhia aérea considerando FCA's e em negociar com uma companhia aérea concorrente os melhores *slots* disponíveis.

Para tratar com o problema da alocação de *slots*, o modelo foi dividido em dois estágios, otimização de alocação de *slots* e otimização de associação de *slots* como mostra a Figura 4.3.

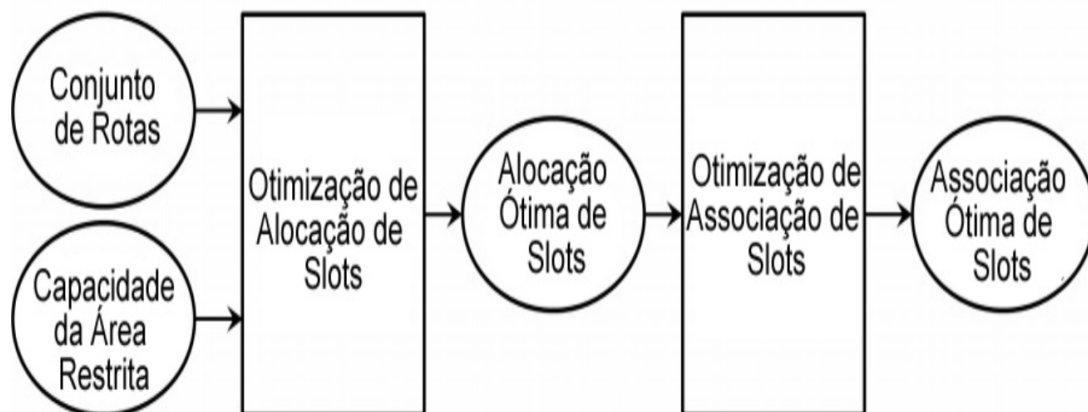


Figura 4.3: Procedimentos de Otimização (Adaptada) [9].

O objetivo do primeiro estágio, otimização de alocação de *slots*, foi achar uma alocação ótima de *slots* para FCA de modo que reduzisse os custos totais, tendo em vista a competição com outra companhia aérea e a possível combinação de trajetórias.

O primeiro estágio recebeu como entrada o conjunto de aeronaves com os horários de seus voos, a demanda e capacidade das FCA's determinadas pela FAA e o conjunto de possíveis rotas.

Com essas informações, fez-se a ordenação do horário mínimo de entrada em cada FCA, que faz parte do algoritmo do CTOP, depois escolheu-se a trajetória com o melhor *slot* disponível para cada voo até ter a lista final de voos capturados pelo CTOP.

O propósito foi procurar para a companhia aérea em questão uma alocação com o menor atraso viável diante do conjunto global de voos capturados pelo CTOP e esse processo de decisão foi representado em forma de árvore como mostra a Figura 4.4.

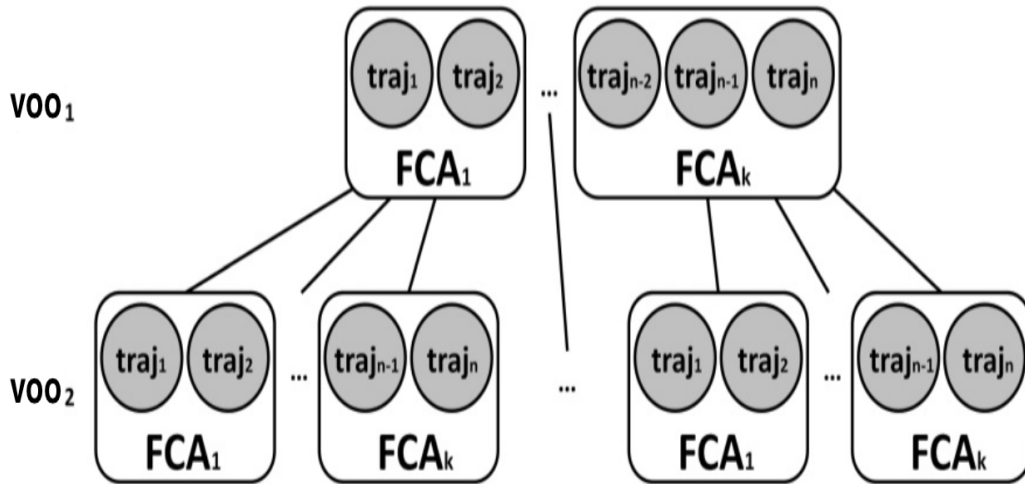


Figura 4.4: Árvore de Busca Agrupada por FCA (Adaptada) [9].

Para cada combinação do algoritmo, foi possível apresentar o valor global de atraso da companhia aérea que seria a soma de todos os atrasos de um determinado período e a saída do módulo desse primeiro estágio seria o melhor conjunto de trajetórias gerando uma alocação ótima de *slots* que pode ser visto na Figura 4.5.

Nota-se na Figura 4.4 que escolheu-se os *slots* em negrito, pois tinham o menor atraso global dentre todas as opções.

O segundo estágio, otimização da associação de *slots*, baseiou-se nos resultados do primeiro estágio, utilizando-os como entrada para gerar uma atribuição de *slots* ótima.

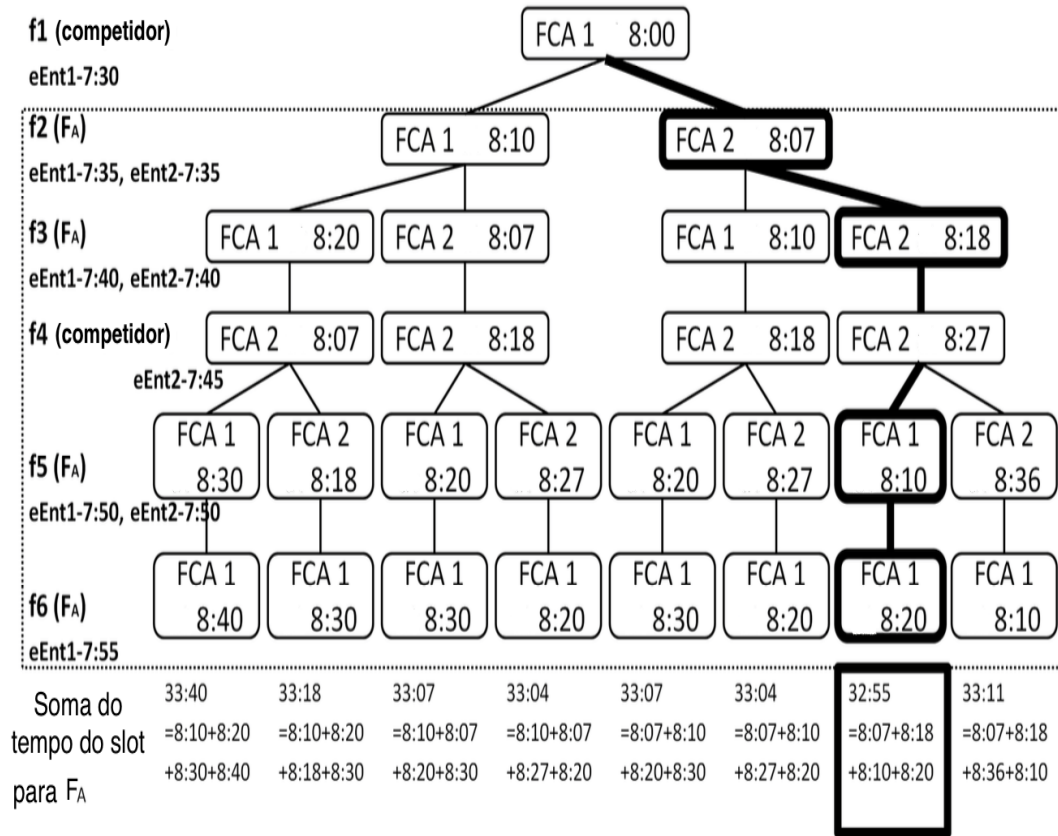


Figura 4.5: Exemplo do Algoritmo de Busca (Adaptada) [9].

Além disso, foram utilizadas como entrada também, o conjunto de aeronaves com os horários de seus voos, a demanda e capacidade das FCA's determinadas pela FAA, o conjunto de possíveis rotas e os custos de voo em rota e atraso na decolagem e pouso.

Já que no contexto do CTOP é permitido trocas internas de *slots* através de mudanças de voos, o modelo considerou o primeiro estágio como a representação da alocação inicial do CTOP e o segundo estágio como o algoritmo que permitiu realizar essas trocas.

Além do mais, existe a estratégia de enviar "NOSLOT", ou seja, a opção de voar por fora das FCA's e, dessa forma, não escolher nenhum *slot* para gerar otimização dos resultados. Contudo, nesse modelo optou-se por não utilizar essa estratégia de modo que reduzisse a complexidade do algoritmo.

Os resultados alcançados no modelo de CTOP usando *greedy* por Bosung e Clarke [9] consistiram em analisar os custos dos atrasos de chegada em horas de todos os voos capturados pelo CTOP nos três seguintes cenários: caso base do CTOP sem aplicação do algoritmo *greedy*, o caso com a aplicação do primeiro estágio do modelo e o caso com a aplicação do segundo estágio do modelo. A Figura 4.6 apresenta esses resultados.

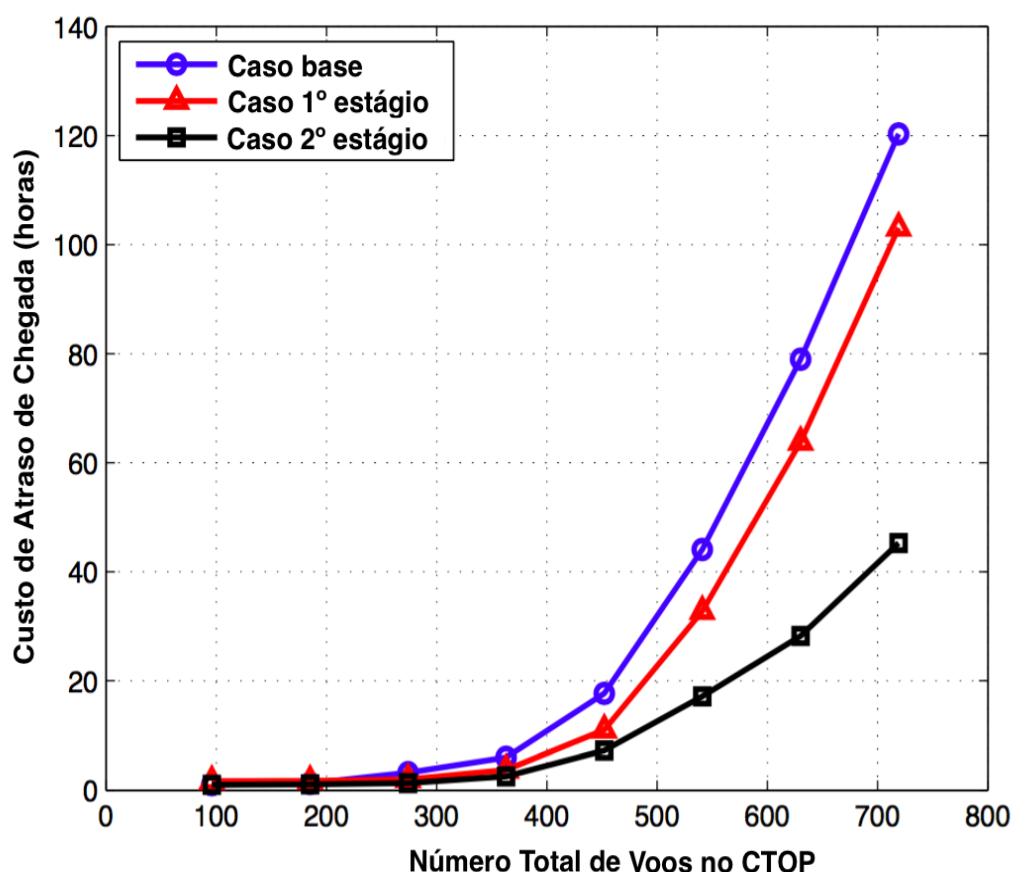


Figura 4.6: Comparação entre Resultados (Adaptada) [9].

Ao analisar os resultados da Figura 4.6, percebe-se que os autores tiveram resultados mais satisfatórios do que teriam se apenas aplicassem o algoritmo do CTOP puro. Nota-se também que os melhores resultados alcançados cresceram proporcionalmente em relação a quantidade total de voos, sendo que em alguns casos o atraso diminuiu mais que 60% dependendo da intensidade dos voos.

É importante salientar que o modelo não leva em consideração possíveis estratégias que a companhia aérea concorrente poderia ter, pois quando efetua-se a busca no primeiro estágio do modelo atribui-se a companhia aérea concorrente o menor *slot* que daria a companhia aérea que utiliza esse algoritmo o menor atraso.

Além disso, esse modelo considera que o sistema de suporte à decisão tem acesso a todos os voos e horários planejados para os voos capturados pelo CTOP. Entretanto, nas diretrizes atuais do CTOP, as companhias aéreas apenas conhecem as informações de seus próprios voos e não os de todos os envolvidos no CTOP, logo o modelo não é tão realístico e torna-se difícil utilizá-lo na prática.

### 4.3 Alocação de *Slots* com Teoria dos Jogos no CTOP

Uma abordagem diferente foi proposta por Cruciol em 2015 que utilizava Teoria dos Jogos para lidar com a otimização da alocação de voos por parte das companhias aéreas utilizando o CTOP [8].

Essa abordagem propôs que a combinação de jogadas para a alocação dos voos resultaria na menor quantidade de minutos de atraso nos voos capturados pelo CTOP para cada companhia aérea ao final do jogo.

O modelo contou como entrada o uso de duas áreas restritas de fluxo (FCA's) e a negociação entre duas companhias aéreas, *CompanhiaAéreaA* e *CompanhiaAéreaB*.

O modelo utilizou três casos referentes às proporções dos voos entre as companhias aéreas que poderiam ser divididas em 50% | 50%, 67% | 33% e 25% | 75% .

Além disso, foi feito usando como base o Dilema dos Prisioneiros, exemplo abordado na seção de Teoria dos Jogos, e a visão geral do modelo com uso do TOS pode ser visto na Figura 4.7.

		Cia. Aérea B	
Cia. Aérea A	1 TOS	1 TOS	1 TOS
	2 TOS	2 TOS	2 TOS
	1 TOS	1 TOS	2 TOS
	2 TOS	1 TOS	2 TOS

Figura 4.7: Visão Geral do Modelo em Teoria dos Jogos [8].

Estipulou-se os seguintes movimentos que poderiam ser feitos nos jogos:

- **Movimento (11):** cada companhia poderia enviar um TOS com a melhor trajetória global por voo.
- **Movimento (22):** cada companhia poderia enviar dois TOS representando a melhor trajetória em cada FCA por voo.

- **Movimento (21):** a *CompanhiaAéreaA* poderia enviar dois TOS representando a melhor trajetória em cada FCA por voo e a *CompanhiaAéreaB* poderia enviar um TOS com a melhor trajetória global por voo.
- **Movimento (12):** a *CompanhiaAéreaA* poderia enviar um TOS com a melhor trajetória global por voo e a *CompanhiaAéreaB* poderia enviar dois TOS representando a melhor trajetória em cada FCA por voo.

Executou-se o algoritmo de Teoria dos Jogos usando a combinação de cada um desses movimentos descritos para cada caso e verificou-se o atraso global e o atraso dos voos rastreados para a *CompanhiaAéreaA* como mostra a Figura 4.8.

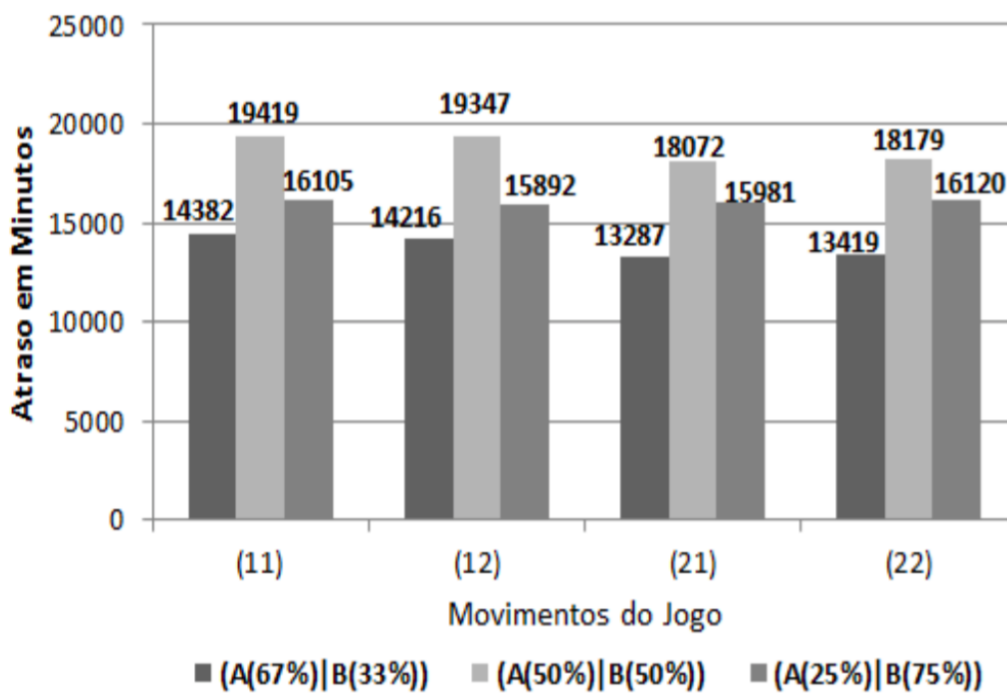


Figura 4.8: Movimentos dos Jogo [8].

Além disso, comparou-se o resultados obtidos com a abordagem *greedy* demonstrados na Figura 4.9.

Pela análise da Figura 4.9, a abordagem de Teoria dos Jogos teve atrasos maiores do que o *greedy*. Entretanto, deve-se considerar que a abordagem *greedy* alcança um resultado ótimo teórico, pois tem-se o conhecimento de todos os voos e horários envolvidos no CTOP, o que na realidade, não acontece, apenas a FAA detém essas informações.

Já quando analisa-se a abordagem que usa Teoria dos Jogos, que utiliza um modelo mais próximo da realidade, observa-se que a diferença comparado ao *greedy* é cerca de uma variação entre 16% a 27% maior de atraso, o que não é tão grande.

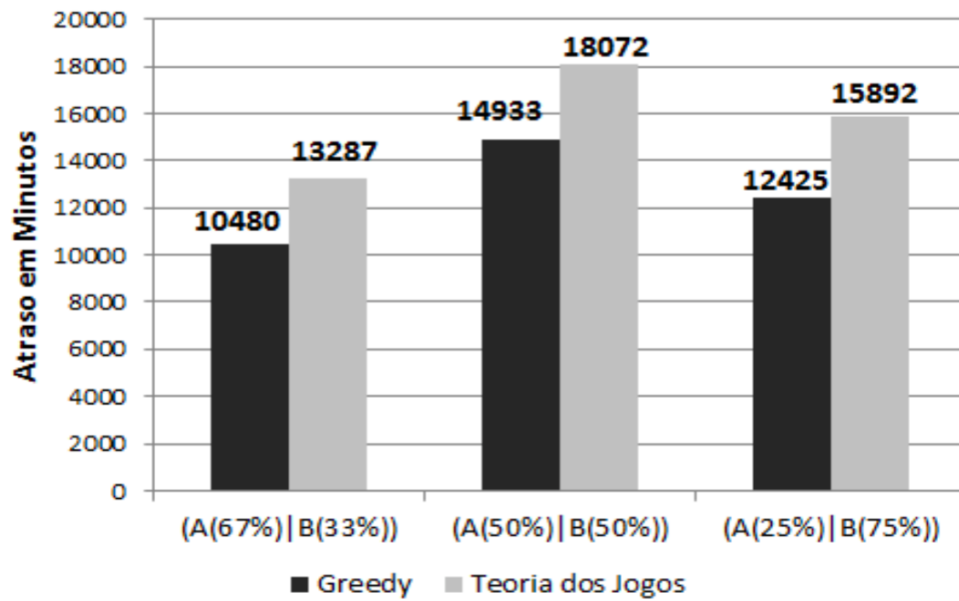


Figura 4.9: Comparação dos Resultados entre *Greedy* e Teoria dos Jogos para Cia. A [8].

Pode-se analisar também que os movimentos com menores atrasos foram o movimento (21) de que a *CompanhiaAéreaA* enviasse dois TOS representando a melhor trajetória em cada FCA por voo e a *CompanhiaAéreaB* enviasse um TOS com a melhor trajetória global por voo para os casos 67% e 33% e 50% e 50% e o movimento (12) que a *CompanhiaAéreaA* enviasse um TOS com a melhor trajetória global por voo e a *CompanhiaAéreaB* enviasse dois TOS representando a melhor trajetória em cada FCA por voo para o caso 25% e 75%.

Essa última abordagem é voltada para o cenário dos EUA em que existe uma grande quantidade de trajetórias para os voos e a Teoria dos Jogos consiste na escolha dos melhores Conjuntos de Opções de Trajetórias.

A proposta desse projeto mais se aproximará dessa última abordagem, pois utilizará também Teoria dos Jogos para otimizar a alocação de *slots* usando o CTOP. No entanto, a abordagem desse projeto consiste no uso de apenas um TOS por companhia aérea, devido a limitação de trajetórias no cenário aéreo brasileiro, e a Teoria dos Jogos é voltada para favorecer os principais voos das companhias aéreas e não as melhores trajetórias globais.



# Capítulo 5

## Modelagem e Implementação

### 5.1 Descrição do Sistema

Atualmente, existem soluções computacionais nas mais diversas áreas de atuação e, quando se analisa o cenário aéreo brasileiro, é possível verificar uma ausência parcial das tecnologias mais atualizadas e eficientes para o gerenciamento do tráfego aéreo.

A partir de estudos de aplicações do ATM nos EUA, tomou-se conhecimento do Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*) (CTOP) e seus benefícios, e verificou-se que a implementação do CTOP exatamente como funciona nos EUA não é viável devido a quantidade limitada de rotas e voos.

No entanto, a proposta dessa pesquisa é uma versão adaptada do CTOP para o contexto brasileiro, pois esse programa poderia trazer muitos benefícios para o país como uma solução para condições adversas, as quais poderiam causar grandes atrasos e impactos no tráfego aéreo.

Neste trabalho, é desenvolvido uma solução computacional que utiliza o conceito principal do CTOP em uso nos EUA, que se resume a um sistema que em casos de adversidade executa o algoritmo do CTOP para os voos afetados pelas áreas de restrição, realizando a alocação de *slots* para esses voos.

Além disso, para a adaptação ao cenário brasileiro, propôs-se a abordagem de Teoria dos Jogos para um modelo em que as companhias aéreas possam negociar entre si os *slots* definidos pelo CTOP e atingirem melhores resultados.

Dessa forma, essa seção foi dividida em duas etapas:

1. Aplicação do CTOP
2. Negociação com Teoria dos Jogos
3. Banco de Dados

Para a implementação da solução computacional, preferiu-se escolher por *software* de distribuição livre visando como principais aspectos simplicidade e versatilidade em manipulação de dados.

Para o desenvolvimento desse estudo foram utilizados:

- **Linguagem de programação:** *Personal Home Page* (PHP).
- **Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados:** *My Structured Language* (MySQL).

Por fim, como base de dados foram utilizados os voos os quais foram extraídos do sistema da ANAC na data de 15 de julho de 2017 [65].

## 5.2 Aplicação do CTOP

A modelagem para a aplicação do CTOP possui o seguinte fluxo de informações:

- **Carga de voos:** conforme as definições do cenário a ser usado como o período de tempo que o CTOP será executado e as regiões geográficas que representarão as áreas de restrição dos voos, define-se os voos, as companhias aéreas e os aeroportos que serão capturados pelo CTOP, os quais serão armazenados no banco de dados e representarão a carga de voos para a execução do algoritmo.
- **Sorteio da distribuição dos voos:** é sorteado a distribuição dos voos para cada companhia aérea de acordo com o estudo de caso definido. A captura de tela pode ser visualizada na Figura 5.1.
- **Sorteio dos *slots* disponíveis nas FCA's:** a partir da definição do período de tempo entre as áreas de restrição e os aeroportos de destino, são escolhidos aleatoriamente os *slots* disponíveis nas FCA's para que os voos sejam alocados. A captura de tela pode ser visualizada na Figura 5.2.
- **Sorteio dos *slots* dos voos para entrarem nas FCA's (EAT):** a partir do período de tempo definido entre as áreas de restrição e os aeroportos de destino, são escolhidos aleatoriamente os *slots* de todos os voos que serão capturados pelo CTOP para entrarem nas FCA's baseado em seus horários originais de destino, que é chamado de *Early Arrival Time* (EAT). A captura de tela pode ser visualizada na Figura 5.3.
- **Início do CTOP:** o algoritmo do CTOP é colocado em execução.

← → ↻ ⓘ localhost:8888/ctop/create\_flights\_75\_25.php

```
FLIGHTS_75_25 TABLE CREATED SUCCESSFULLY
```

airline	origin	destination	departure	arrival	priority
companhiaB	SBEG	SBGR	15:10:00	17:00:00	N
companhiaB	SBFZ	SBGR	15:07:00	17:05:00	N
companhiaB	SBTE	SBSP	15:00:00	17:09:00	N
companhiaA	SBBE	SBSP	14:30:00	17:11:00	N
companhiaA	SBSV	SBGR	14:46:00	17:14:00	N
companhiaB	SBBR	SBSP	15:45:00	17:15:00	N
companhiaB	SBCO	SBSP	15:45:00	17:20:00	N
companhiaB	SBRF	SBGR	14:00:00	17:20:00	N
companhiaA	SBCF	SBGR	16:10:00	17:25:00	N
companhiaB	SBRF	SBSP	14:10:00	17:25:00	N
companhiaB	SBJP	SBSP	14:30:00	17:30:00	N
companhiaB	SBBR	SBGR	15:45:00	17:35:00	N
companhiaB	SBSG	SBSP	13:30:00	17:35:00	N
companhiaA	SBAR	SBSP	14:48:00	17:36:00	N
companhiaB	SBSV	SBGR	15:05:00	17:40:00	N
companhiaB	FAOR	SBGR	06:55:00	17:40:00	H
companhiaB	SBCF	SBSP	16:30:00	17:45:00	N

Figura 5.1: Captura de Tela do Sorteio da Distribuição dos Voos.

← → ↻ ⓘ localhost:8888/ctop/run\_50\_50.php

```
AVAILABLE SLOTS FCA
```

slot FCA1: 16:08:00	slot FCA2: 16:06:00
slot FCA1: 16:12:00	slot FCA2: 16:14:00
slot FCA1: 16:25:00	slot FCA2: 16:22:00
slot FCA1: 16:33:00	slot FCA2: 16:36:00
slot FCA1: 16:46:00	slot FCA2: 16:41:00
slot FCA1: 16:52:00	slot FCA2: 16:54:00
slot FCA1: 17:05:00	slot FCA2: 17:07:00
slot FCA1: 17:17:00	slot FCA2: 17:18:00
slot FCA1: 17:28:00	slot FCA2: 17:26:00
slot FCA1: 17:33:00	slot FCA2: 17:31:00
slot FCA1: 17:41:00	slot FCA2: 17:46:00
slot FCA1: 17:55:00	slot FCA2: 17:53:00
slot FCA1: 18:07:00	slot FCA2: 18:06:00
slot FCA1: 18:12:00	slot FCA2: 18:17:00
slot FCA1: 18:23:00	slot FCA2: 18:28:00
slot FCA1: 18:36:00	slot FCA2: 18:32:00
slot FCA1: 18:44:00	slot FCA2: 18:45:00

Figura 5.2: Captura de Tela do Sorteio dos *Slots* Disponíveis nas FCA's.

← → ↻ localhost:8888/ctop/run_50_50.php	
EARLY ARRIVAL TIME SLOTS FCA	
EAT - FCA1: 16:18:00	EAT - FCA2: 16:22:00
EAT - FCA1: 16:22:00	EAT - FCA2: 16:26:00
EAT - FCA1: 16:26:00	EAT - FCA2: 16:30:00
EAT - FCA1: 16:27:00	EAT - FCA2: 16:32:00
EAT - FCA1: 16:31:00	EAT - FCA2: 16:38:00
EAT - FCA1: 16:34:00	EAT - FCA2: 16:35:00
EAT - FCA1: 16:36:00	EAT - FCA2: 16:44:00
EAT - FCA1: 16:37:00	EAT - FCA2: 16:43:00
EAT - FCA1: 16:44:00	EAT - FCA2: 16:50:00
EAT - FCA1: 16:43:00	EAT - FCA2: 16:44:00
EAT - FCA1: 16:52:00	EAT - FCA2: 16:53:00
EAT - FCA1: 16:53:00	EAT - FCA2: 16:50:00
EAT - FCA1: 17:00:00	EAT - FCA2: 16:57:00
EAT - FCA1: 16:59:00	EAT - FCA2: 16:52:00
EAT - FCA1: 16:55:00	EAT - FCA2: 17:01:00
EAT - FCA1: 17:02:00	EAT - FCA2: 16:57:00
EAT - FCA1: 17:09:00	EAT - FCA2: 17:04:00

Figura 5.3: Captura de Tela do Sorteio do EAT das FCA's.

- **Ordenação dos voos por IAT:** antes dos voos serem alocados, eles são ordenados pelo menor tempo de EAT para que gere a lista de voos ordenados por *Initial Arrival Time* (IAT). A captura de tela pode ser visualizada na Figura 5.4.

← → ↻ localhost:8888/ctop/run_50_50.php	
INITIAL ARRIVAL TIME SLOTS FCA	
IAT - FCA1: -	IAT - FCA2: 16:20:00
IAT - FCA1: 16:23:00	IAT - FCA2: -
IAT - FCA1: -	IAT - FCA2: 16:26:00
IAT - FCA1: -	IAT - FCA2: 16:27:00
IAT - FCA1: -	IAT - FCA2: 16:30:00
IAT - FCA1: -	IAT - FCA2: 16:34:00
IAT - FCA1: -	IAT - FCA2: 16:36:00
IAT - FCA1: 16:39:00	IAT - FCA2: -
IAT - FCA1: 16:42:00	IAT - FCA2: -
IAT - FCA1: 16:44:00	IAT - FCA2: -
IAT - FCA1: 16:47:00	IAT - FCA2: -
IAT - FCA1: 16:51:00	IAT - FCA2: -
IAT - FCA1: -	IAT - FCA2: 16:51:00
IAT - FCA1: -	IAT - FCA2: 16:55:00
IAT - FCA1: 16:57:00	IAT - FCA2: -
IAT - FCA1: 17:00:00	IAT - FCA2: -
IAT - FCA1: 17:00:00	IAT - FCA2: -

Figura 5.4: Captura de Tela da Ordenação por IAT das FCA's.

- **Alocação dos voos de exceção:** todos os voos considerados como exceção são os primeiros a serem alocados.
- **Alocação dos voos por ordem de IAT:** os demais voos são alocados de acordo com a ordem de IAT e a disponibilidade dos *slots*.
- **Geração da lista final do CTOP:** lista com todos os voos capturados pelo algoritmo do CTOP. A captura de tela pode ser visualizada na Figura 5.5.



flight_id	airline	fca1	fca2	fca	slot	delay	priority
A2	companhiaB	16:27:00	16:20:00	fca2	16:21:00	00:01:00	N
A1	companhiaB	16:24:00	16:21:00	fca1	16:33:00	00:09:00	N
A3	companhiaB	16:32:00	16:27:00	fca2	16:36:00	00:09:00	N
A4	companhiaA	16:30:00	16:34:00	fca2	16:42:00	00:08:00	N
A6	companhiaB	16:32:00	16:37:00	fca1	16:46:00	00:14:00	N
A5	companhiaA	16:37:00	16:39:00	fca1	16:53:00	00:16:00	N
A16	companhiaB	17:01:00	16:55:00	fca2	16:55:00	00:00:00	H
A7	companhiaB	16:41:00	16:40:00	fca2	17:08:00	00:28:00	N
A8	companhiaA	16:43:00	16:42:00	fca1	17:09:00	00:26:00	N
A10	companhiaB	16:45:00	16:47:00	fca1	17:13:00	00:28:00	N
A9	companhiaA	16:43:00	16:49:00	fca2	17:18:00	00:29:00	N
A11	companhiaA	16:49:00	16:48:00	fca2	17:25:00	00:37:00	N
A14	companhiaB	16:57:00	17:00:00	fca1	17:27:00	00:30:00	N
A12	companhiaB	17:00:00	16:59:00	fca1	17:31:00	00:31:00	N
A13	companhiaA	16:51:00	16:57:00	fca2	17:33:00	00:36:00	N
A15	companhiaA	17:02:00	17:01:00	fca1	17:40:00	00:38:00	N
A17	companhiaB	17:01:00	17:04:00	fca2	17:46:00	00:42:00	N
A18	companhiaA	17:05:00	17:01:00	fca1	17:50:00	00:45:00	N
A19	companhiaB	17:02:00	17:10:00	fca2	17:51:00	00:41:00	N
A20	companhiaA	17:02:00	17:10:00	fca2	18:06:00	00:56:00	N
A21	companhiaA	17:08:00	17:11:00	fca1	18:07:00	00:59:00	N
A22	companhiaB	17:18:00	17:20:00	fca2	18:15:00	00:55:00	N
A23	companhiaB	17:26:00	17:24:00	fca1	18:18:00	00:52:00	N

Figura 5.5: Captura de Tela da Lista Final do CTOP.

A Figura 5.6 mostra a modelagem da execução do CTOP e o algoritmo do CTOP pode ser compreendido pelo pseudo-código do **Algorithm 1**.

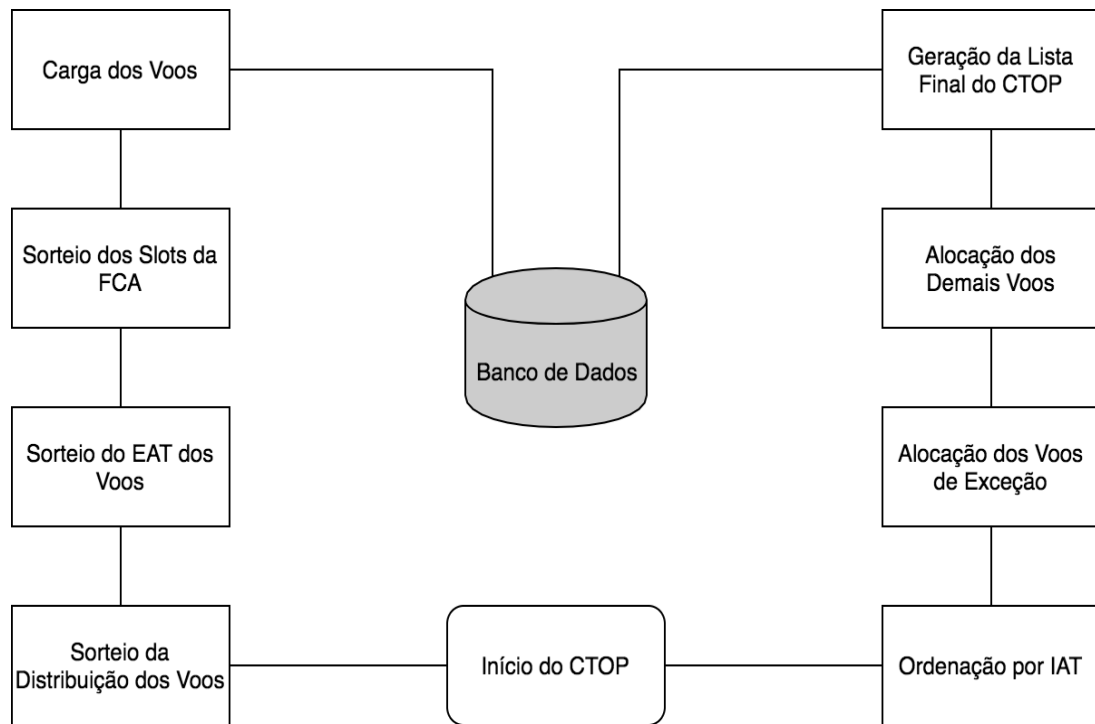


Figura 5.6: Modelagem da Execução do CTOP.

---

**Algorithm 1** Algoritmo do CTOP

---

```

1: procedure CTOP
2:   Entrada: voos
3:   seleciona voos
4:   sorteia voos para as companhias aéreas
5:   sorteia slots para FCA's
6:   sorteia slots para os voos (EAT)
7:   ordena voos por IAT
8:   insere voos de exceção
9:   insere demais voos por ordem de IAT
10:  Saída: lista final do CTOP
11: end procedure
  
```

---

## 5.3 Negociação com Teoria dos Jogos

### 5.3.1 Definições Iniciais da Negociação

A negociação entre as companhias aéreas começa quando o CTOP gera a lista final. O objetivo é que as companhias aéreas possam negociar a troca de seus *slots* para diminuir seus atrasos e priorizar seus voos mais importantes. Nesse estudo, o processo de negociação é visto como um jogo que será a disputa das companhias aéreas pelos *slots*.

Como no cenário aéreo atual brasileiro não existem muitas companhias aéreas que competem entre si e para simplificação do uso de Teoria dos Jogos, optou-se por utilizar duas companhias aéreas para a negociação.

Para definir como as companhias aéreas iriam negociar seus voos, utilizou-se como principal critério os atrasos dos voos que foram divididos em duas categorias:

- **Atraso Global:** é a soma do atraso de todos os voos contidos no jogo pela companhia aérea.
- **Atraso Prioritário:** é a soma do atraso de todos os voos prioritários no jogo pela companhia aérea.

Voos prioritários foram definidos como os voos que as companhias aéreas têm prioridade que representariam os voos que as companhias aéreas consideram muito importantes e que deveriam ter o menor atraso possível como, por exemplo, voos que têm escalas que poderiam resultar em um acúmulo muito grande de atrasos.

Nesse estudo para definir os voos prioritários das companhias aéreas, sorteou-se de acordo com uma certa porcentagem os voos que seriam normais e os voos que seriam prioritários.

Vale ressaltar que se abordou a metodologia que as companhias aéreas não têm conhecimento dos voos uma da outra e, dessa forma, elas não sabem quais são os voos normais ou prioritários da companhia aérea oponente.

Além disso, quando o CTOP é executado, não é levado em consideração os voos prioritários das companhias aéreas, todos os voos são tratados como voos normais já que o principal critério do CTOP é a ordenação por IAT dos voos.

O propósito da abordagem com Teoria dos Jogos é que sejam considerados os voos prioritários das companhias aéreas e suas preferências para a alocação de *slots* e não meramente seus horários de chegada para que, assim, possam ser minimizados os impactos dos atrasos dos voos.

### 5.3.2 Definições Iniciais do Jogo

O jogo desenvolvido é baseado em regras, não-cooperativo, com informação incompleta, dinâmico, repetido, discreto e de soma não-zero que correspondem, respectivamente, as companhias aéreas obedecem a regras, buscam suas melhores estratégias individuais, têm conhecimento apenas de seus voos e das informações providas pelo CTOP, seguem uma sequência para tomar decisões, conseguem prolongar-se indefinidamente, possuem uma quantidade de decisões limitadas e têm um resultado final que não é constante.

O jogo consiste na disputa de *slots* entre as companhias aéreas em que cada uma irá barganhar com a outra para conseguir os melhores *slots*, sendo que haverá um histórico que armazenará as decisões de aceitação e rejeição das barganhas que poderá influenciar nas decisões tomadas pelas companhias aéreas.

Além disso, o jogo é delimitado pelo período que acontecerão as negociações de acordo com os horários dos voos, jogadas efetuadas pelas companhias aéreas e as recompensas que cada companhia recebe de acordo com as taxas de aceitação ou rejeição.

Os parâmetros do jogo são definidos como:

- **Jogo:** disputa entre as companhias aéreas pelos *slots*.
- **Jogadores:** companhias aéreas.
- **Jogada:** sequência de movimentos das companhias aéreas.
- **Negociação:** barganha feita pela companhia aérea.
- **Aceitação:** acontece quando as demandas feitas pela companhia aérea são cumpridas, ou seja, a aceitação da negociação.
- **Rejeição:** acontece quando as demandas feitas pela companhia aérea não são cumpridas, ou seja, a negação da negociação.
- **Janela de tempo:** delimita o intervalo específico de horas de início e fim dos voos.
- **Rodada:** execução do algoritmo para uma janela de tempo específica em que resulta em aceitação ou rejeição. Em caso de rejeição, prossegue-se para a próxima rodada, em caso de aceitação, finaliza-se a negociação para essa janela.
- **Recompensa:** quando a taxa de aceitação é razoável a recompensa é que todas as propostas de negociação são analisadas. Para altas taxas de rejeição, a recompensa é que a proposta é negada antes mesmo de ser analisada.
- **Movimentos:** são as propostas feitas pelas companhias aéreas de acordo com o Conjunto de Opções de Trajetória (*Trajectory Options Set*) (TOS).
- **Estratégia:** reduzir o atraso prioritário ou global dos voos.



### 5.3.3 Aplicação de Teoria dos Jogos

No jogo, utilizou-se o conceito de Barganha de Nash em que cada barganha foi caracterizada no jogo como uma rodada. A Barganha de Nash foi definida como o par de resultados  $(p_1, p_2)$  provenientes da otimização representada pela equação Equação 5.1:

$$\max(p_1, p_2) = (p_1 - d_1) \times (p_2 - d_2) | (p_1, p_2) \in \cup(p_1, p_2) \geq (d_1, d_2) \quad (5.1)$$

Em que  $p_1$  e  $p_2$  seriam as preferências das companhias aéreas, e que a barganha só seria aceita se houvesse a maximização das preferências de ambas as companhias, ou seja, se houvesse a aceitação de suas preferências de forma que elas fossem maiores que as demandas,  $d_1$  e  $d_2$ .

Então, foi definido que após a execução do CTOP a companhia aérea faria uma barganha para a outra companhia aérea expressando suas preferências sobre determinado período do *slot* que corresponderia ao envio do TOS. Se a companhia que recebeu a barganha aceitar, acaba-se a negociação, porém se ela rejeitar, deve-se propor uma nova barganha.

Ao propor a barganha estabeleceu-se que na primeira tentativa de barganhar, a companhia aérea mandaria o TOS com duas opções, a primeira opção que favorecesse ela mesma e a segunda opção, favorecendo a concorrente e que seguiriam as seguintes estratégias:

- **1ª Opção:** Trocar seu voo prioritário com maior atraso pelo melhor *slot* disponível pelo CTOP e se não houver voo prioritário trocar o voo normal com maior atraso.
- **2ª Opção:** Trocar seu voo normal com menor atraso por um *slot* disponível pelo CTOP que viesse depois do seu voo.

A ideia é que a companhia aérea consiga um melhor *slot* para seu voo prioritário ou seu voo normal de maior atraso, mesmo que em troca tenha que sacrificar um de seus *slots* de um voo normal.

Caso a barganha fosse rejeitada, a companhia ainda tentaria barganhar mais uma vez com opções que considerassem o histórico passado, usaria o seguinte conjunto de estratégias:

- **3ª Opção:** Repetir a jogada anterior feita pela companhia concorrente que favorecesse a companhia concorrente.
- **4ª Opção:** Propor trocar seu voo prioritário com maior atraso pelo melhor *slot* disponível pelo CTOP e se não houver voo prioritário trocar o voo normal com maior atraso.

Essa última barganha foi escolhida desse modo para que tornasse a possibilidade da companhia aérea concorrente de aceitar a proposta muito maior e, ao mesmo tempo, favorecesse a companhia que fez a oferta, beneficiando seu voo prioritário ou normal com menor atraso.

Definiu-se ainda uma última opção:

- **Última Opção:** caso o algoritmo não encontre nenhuma opção viável no sentido de favorecer a companhia que faz a proposta, seria enviado a opção vazia, representando que a companhia aérea prefere ficar com o *slot* definido pelo CTOP.

Para os primeiros casos de negociação de *slots*, como o atraso não é tão grande, enviar a opção vazia e permanecer com o *slot* fornecido pelo CTOP é mais vantajoso do que efetuar uma troca.

Além da Barganha de Nash, foi incluído também o Teorema de *Folk* nesse estudo. O Teorema de *Folk* pode ser resumido com um jogo de  $n$ -jogadores e um vetor de resultados  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  em que se  $k$  é um resultado de um equilíbrio de Nash de um jogo infinitamente repetido com recompensas, então, para cada jogador definido como  $i$ ,  $k_i$  é possível. Se  $k$  é viável, logo  $k$  é resultado de algum equilíbrio de Nash de algum jogo infinitamente repetido com determinadas recompensas.

Em outras palavras, o Teorema de *Folk* diz que as inúmeras repetições de um jogo fazem com que todos os possíveis resultados do jogo sejam revelados como representação de um equilíbrio de Nash e do uso de recompensas.

Nesse estudo, optou-se por sucessivas repetições do jogo e as recompensas foram medidas através dos históricos de aceitações ou rejeições das barganhas. Logo, dependendo da quantidade de vezes que a companhia aérea rejeita as propostas da concorrente e vice-versa, se o valor for muito alto de rejeição, a companhia aérea escolhe por rejeitar a barganha da outra antes mesmo de sequer analisar a oferta.

Para regular esse nível alto de rejeição, a companhia aérea que tiver essa alta quantidade de rejeição da proposta da concorrente será forçada a começar a aceitar as propostas que vierem, porque senão ela jamais irá conseguir trocar qualquer *slot*, seria sempre rejeitada.

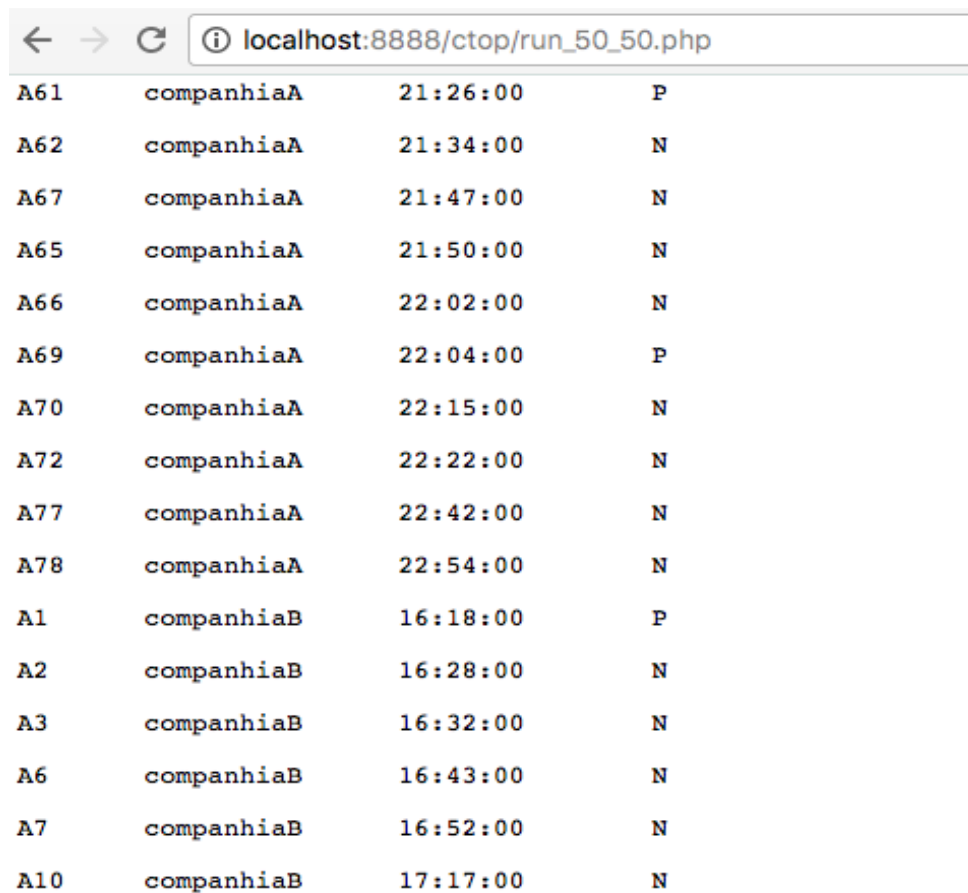
O propósito é que incentive as companhias aéreas a cooperarem entre si e tornar as negociações mais justas, fazendo com que a companhia que não coopere possa ser punida até mudar seu comportamento.

Lembrando que na primeira execução do algoritmo, como não terá histórico consequentemente não terá a aplicação do Teorema de *Folk*, apenas para as execuções posteriores e que se nenhuma negociação for aceita, o que prevalece é a lista final gerada pelo CTOP.

### 5.3.4 Modelagem da Negociação com Teoria dos Jogos

O modelo da Negociação com Teoria dos Jogos pode ser resumidamente definido por meio das seguintes etapas:

- **Carga dos Voos:** carrega do banco de dados a tabela com todos os voos.
- **Sorteio dos Voos Prioritários:** categoriza os voos das companhias aéreas como normais ou prioritários. A captura de tela pode ser visualizada na Figura 5.7.



A61	companhiaA	21:26:00	P
A62	companhiaA	21:34:00	N
A67	companhiaA	21:47:00	N
A65	companhiaA	21:50:00	N
A66	companhiaA	22:02:00	N
A69	companhiaA	22:04:00	P
A70	companhiaA	22:15:00	N
A72	companhiaA	22:22:00	N
A77	companhiaA	22:42:00	N
A78	companhiaA	22:54:00	N
A1	companhiaB	16:18:00	P
A2	companhiaB	16:28:00	N
A3	companhiaB	16:32:00	N
A6	companhiaB	16:43:00	N
A7	companhiaB	16:52:00	N
A10	companhiaB	17:17:00	N

Figura 5.7: Captura de Tela do Sorteio dos Voos Prioritários.

- **Início do jogo:** inicia-se a negociação entre as companhias aéreas
- **Carga da Lista Final do CTOP:** carrega do banco de dados a lista final gerada pelo CTOP.
- **Verificação do Histórico de Jogadas:** o histórico de jogadas é consultado para saber a taxa de aceitação ou rejeição de jogadas. A captura de tela pode ser visualizada na Figura 5.8.

← → ↻ ⓘ localhost:8888/ctop/run_50_50.php			
from companhiaA to companhiaB	round: 1	actual slot: 17:55:00	new slot: 17:33:00
% global delay: -9.09090909091	% priority delay: 0	answer: no	
from companhiaA to companhiaB	round: 1	actual slot: 17:26:00	new slot: 17:44:00
% global delay: -9.09090909091	% priority delay: 0	answer: no	
from companhiaB to companhiaA	round: 2	actual slot: 17:33:00	new slot: 17:12:00
% global delay: 6.20689655172	% priority delay: 53.9473684211	answer: yes	
from companhiaB to companhiaA	round: 2	actual slot: 17:09:00	new slot: 17:55:00
% global delay: 6.20689655172	% priority delay: 53.9473684211	answer: yes	
from companhiaA to companhiaB	round: 1	actual slot: 18:17:00	new slot: 18:04:00
% global delay: 19.4871794872	% priority delay: 0	answer: yes	
from companhiaA to companhiaB	round: 1	actual slot: 18:02:00	new slot: 18:53:00
% global delay: 19.4871794872	% priority delay: 0	answer: yes	
from companhiaA to companhiaB	round: 1	actual slot: 19:34:00	new slot: 19:05:00
% global delay: -3.25925925926	% priority delay: 3.84615384615	answer: no	
from companhiaA to companhiaB	round: 1	actual slot: 19:47:00	new slot: 19:54:00
% global delay: -3.25925925926	% priority delay: 3.84615384615	answer: no	
from companhiaB to companhiaA	round: 2	actual slot: 19:54:00	new slot: 19:34:00
% global delay: 1.37741046832	% priority delay: -23.8095238095	answer: no	
from companhiaB to companhiaA	round: 2	actual slot: 19:31:00	new slot: 19:56:00
% global delay: 1.37741046832	% priority delay: -23.8095238095	answer: no	

Figura 5.8: Captura de Tela do Histórico de Jogadas.

- **Geração de Estratégias:** são geradas as jogadas que podem ou não se basear no histórico.
- **Geração da Lista Final do Jogo:** lista com as negociações do jogo aplicadas. A captura de tela pode ser visualizada na Figura 5.9.

← → ↻ ⓘ localhost:8888/ctop/run_50_50.php							
NEGOTIATION LIST							
flight_id	airline	fca1	fca2	fca	slot	delay	priority
A1	companhiaB	16:19:00	16:15:00	fca1	16:23:00	00:04:00	N
A2	companhiaB	16:25:00	16:29:00	fca1	16:32:00	00:07:00	N
A3	companhiaB	16:25:00	16:34:00	fca2	16:37:00	00:03:00	N
A4	companhiaA	16:31:00	16:32:00	fca2	16:40:00	00:08:00	N
A6	companhiaB	16:40:00	16:31:00	fca1	16:46:00	00:06:00	N
A7	companhiaB	16:38:00	16:43:00	fca2	16:53:00	00:10:00	P
A5	companhiaA	16:39:00	16:34:00	fca1	16:56:00	00:17:00	N
A14	companhiaB	16:59:00	16:57:00	fca2	17:04:00	00:07:00	P
A9	companhiaA	16:44:00	16:45:00	fca2	17:15:00	00:30:00	N
A11	companhiaA	16:45:00	16:49:00	fca1	17:18:00	00:33:00	N
A15	companhiaA	16:56:00	16:59:00	fca2	17:21:00	00:22:00	P
A12	companhiaB	16:57:00	16:51:00	fca1	17:28:00	00:31:00	N
A13	companhiaA	16:57:00	16:53:00	fca1	17:31:00	00:34:00	N
A10	companhiaB	16:44:00	16:47:00	fca2	17:34:00	00:47:00	N
A8	companhiaA	16:42:00	16:38:00	fca2	17:40:00	01:02:00	P
A20	companhiaA	17:02:00	17:09:00	fca1	17:43:00	00:41:00	N
A18	companhiaA	17:06:00	17:03:00	fca1	17:52:00	00:46:00	N
A17	companhiaB	17:03:00	17:05:00	fca2	17:53:00	00:48:00	N
A30	companhiaA	17:39:00	17:40:00	fca1	18:04:00	00:25:00	P
A24	companhiaB	17:26:00	17:28:00	fca2	18:09:00	00:41:00	P
A23	companhiaB	17:30:00	17:24:00	fca1	18:14:00	00:44:00	N
A22	companhiaB	17:18:00	17:24:00	fca2	18:15:00	00:51:00	N

Figura 5.9: Captura de Tela da Lista Final de Negociação.

O modelo da Negociação com Teoria dos Jogos é ilustrado na Figura 5.10 e pode ser representada pelo pseudo-código do **Algorithm 2**.

O modelo que completo que une a abordagem do CTOP e a negociação com Teoria dos Jogos é ilustrado na Figura 5.11.

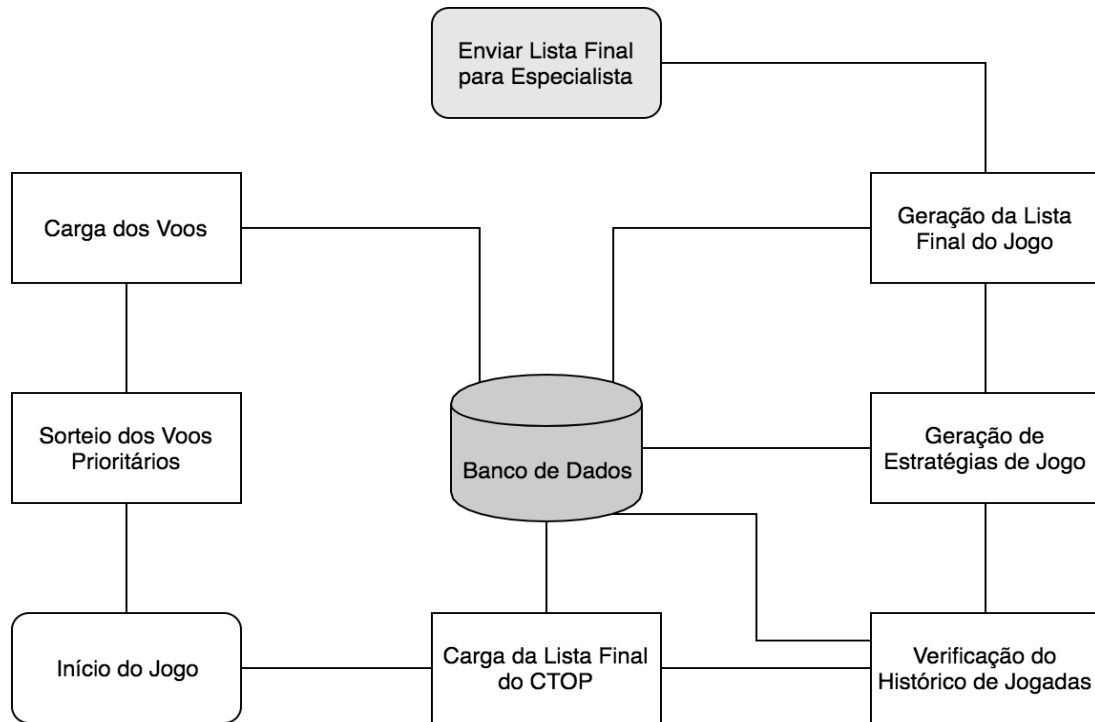


Figura 5.10: Modelagem da Negociação com Teoria dos Jogos.

---

**Algorithm 2** Algoritmo do Jogo

---

```

procedure JOGO
2:   for início da janela de tempo to final da janela de tempo do
      while rodada não é a máxima or proposta não é aceita do
4:       seleciona voos
          seleciona slots
6:       jogador cria nova proposta e manda para competidor
          if taxa de rejeição do competidor and jogador é aceitável then
8:           if proposta de atraso prioritário and atraso global são aceitáveis then
                  proposta aceita
10:          else
                  proposta rejeitada
12:          end if
          else
14:              proposta rejeitada
          end if
16:      end while
          if proposta não foi aceita then
18:              usar resultado do CTOP
          end if
20:  end for
end procedure

```

---

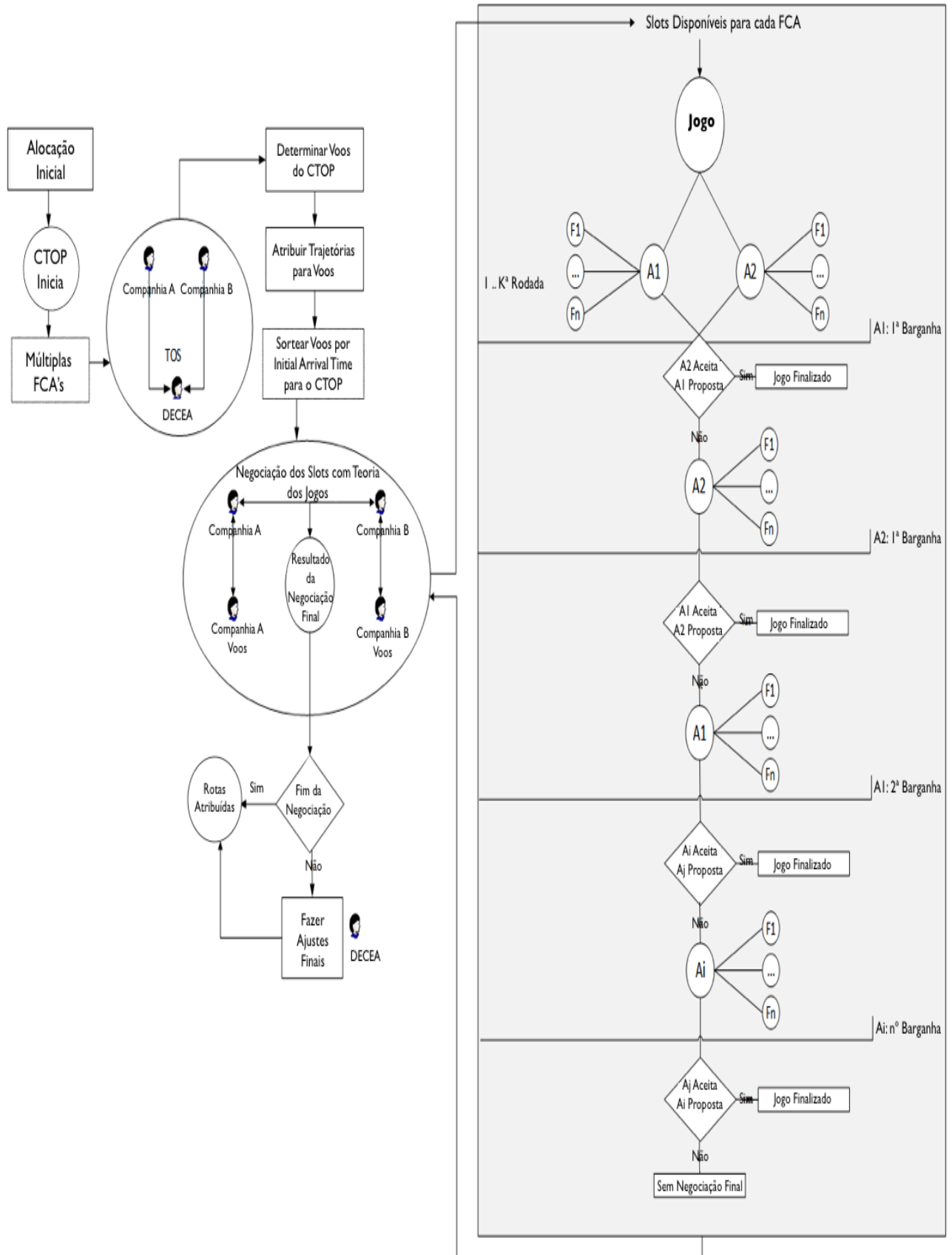


Figura 5.11: Modelo Completo.

## 5.4 Banco de Dados

O banco de dados recebeu como entrada os voos e a partir deles todas as outras tabelas foram geradas. O banco contém as tabelas com os voos, os horários de entrada nas FCA's, EAT, IAT, *slots* disponíveis, resultado do CTOP, histórico, atrasos, porcentagens e lista final de negociação.

O modelo entidade-relacionamento – MER do banco de dados foi dividido em dois, sendo a Figura 5.12 com o modelo para o CTOP e a Figura 5.13 com o modelo para a Negociação por Teoria de Jogos.

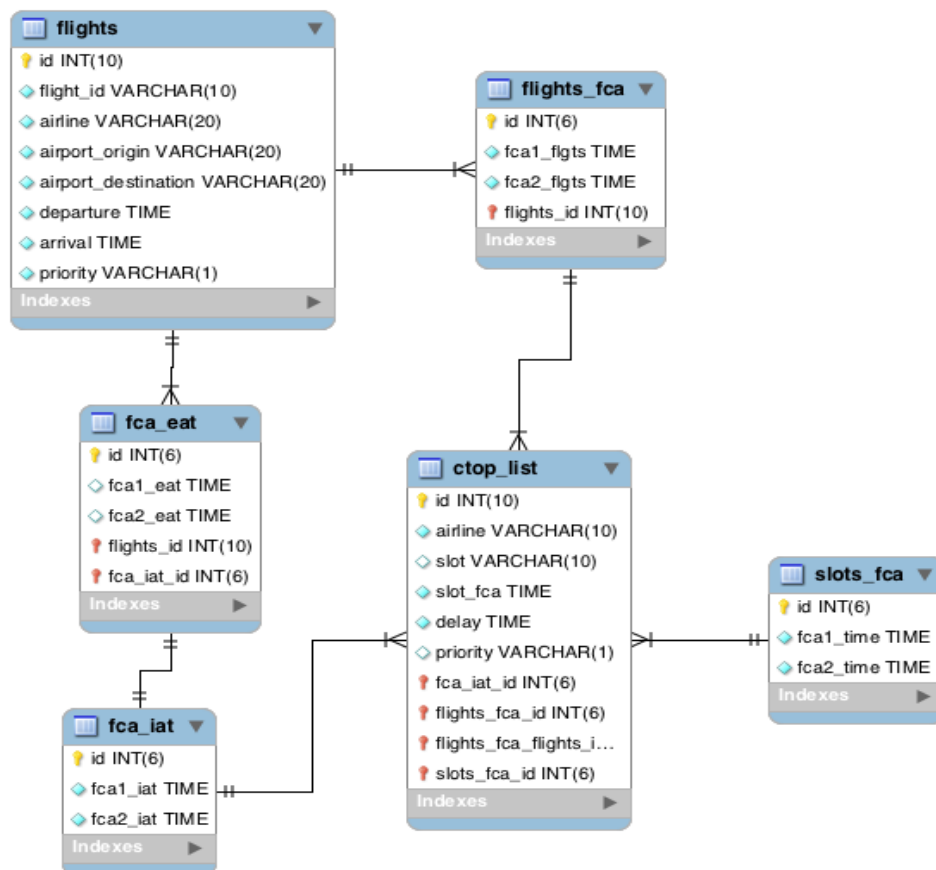


Figura 5.12: Modelo Entidade Relacionamento do CTOP.



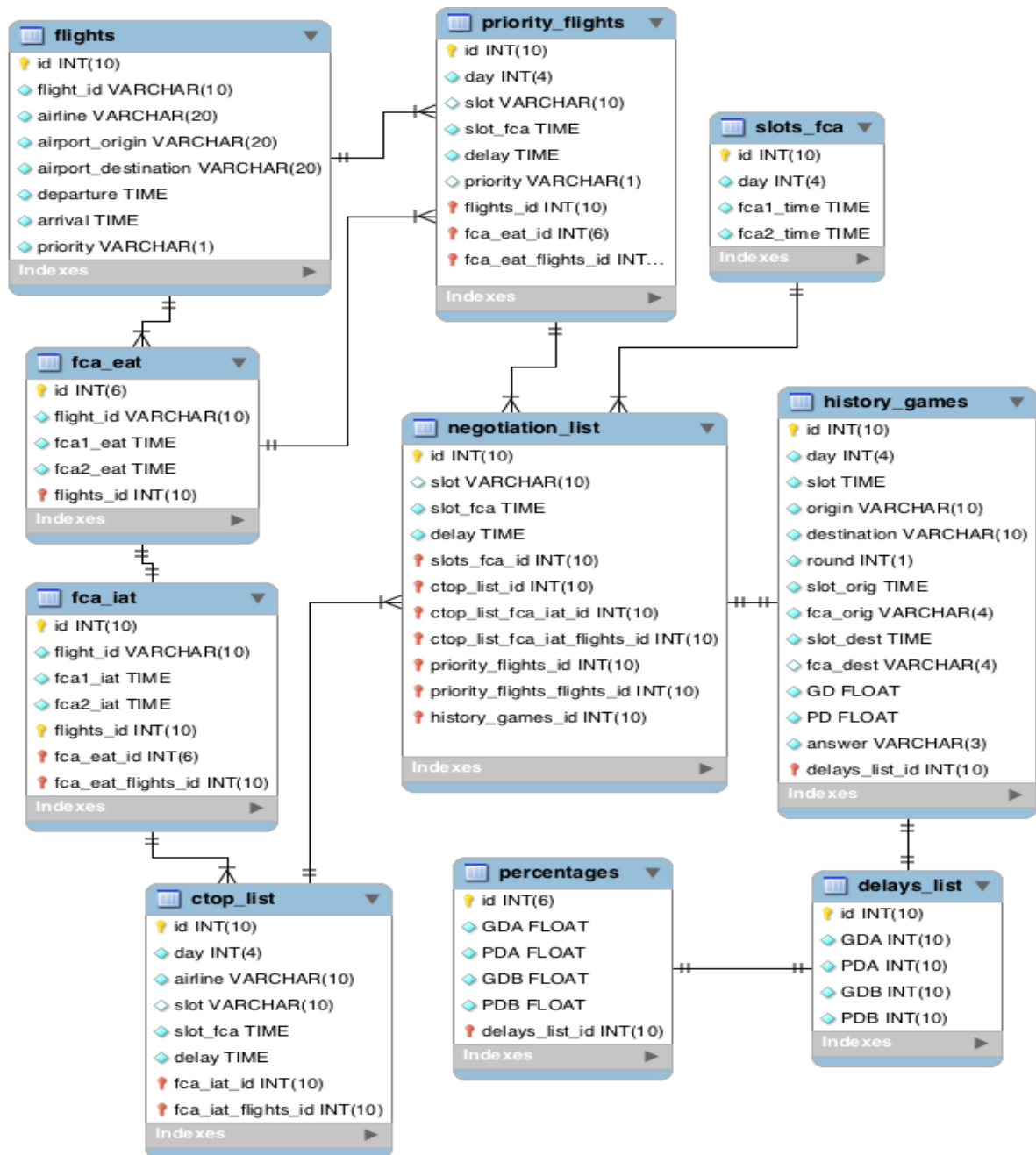


Figura 5.13: Modelo Entidade Relacionamento do Jogo.

# Capítulo 6

## Estudo de Caso

### 6.1 Ambiente de Teste

O ambiente para execução dos testes do estudo de caso é detalhado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Ambiente de Testes

<b>Hardware</b>	4x Intel(R) Core(TM) i5-5250U CPU@1.60GHz-4.00GiB RAM
<b>Sistema Operacional</b>	macOS X El Capitan versão 10.11.6
<b>Servidor Web</b>	Apache 2.0
<b>SGBD</b>	MySQL Workbench Community (GPL) versão 6.2.5
<b>Desenvolvimento Web</b>	PHP versão 7.1.6

### 6.2 Planejamento

O trabalho foi separado em duas etapas em que definiu-se inicialmente a primeira etapa como a alocação dos *slots* de todos os voos de acordo com o CTOP e a segunda como as negociações entre as companhias aéreas utilizando Teoria dos Jogos.

Para o estudo de caso, foram escolhidos três casos com o propósito de analisar o desempenho das companhias aéreas diante de diferentes distribuições de seus voos para englobar uma maior quantidade de dados para análise. Os casos foram:

- **Caso 1:** A *CompanhiaA* e a *CompanhiaB* possuem a mesma quantidade de voos capturados pelo CTOP, ou seja, 50% dos voos para a *CompanhiaA* e 50% dos voos para a *CompanhiaB*.
- **Caso 2:** A *CompanhiaA* possui menos voos capturados pelo CTOP que a *CompanhiaB*, sendo 67% dos voos para a *CompanhiaB* e 33% dos voos para a *CompanhiaA*.

- **Caso 3:** A *CompanhiaA* possui menos voos capturados pelo CTOP que a *CompanhiaB*, sendo 75% dos voos para a *CompanhiaB* e 25% dos voos para a *CompanhiaA*.

### 6.2.1 Condições Iniciais para a Execução do CTOP

As condições iniciais para a alocação dos voos e uso do CTOP envolvem a escolha de parâmetros como a definição das companhias aéreas, aeroportos, voos, horários, localização e capacidade das FCA's.

Para o estudo de caso, foram definidas duas companhias aéreas, a *CompanhiaA* e a *CompanhiaB* e duas FCA's chamadas de *FCA1* e *FCA2*.

A região geográfica para as duas FCA's foi definida como próxima ao Aeroporto Internacional de São Paulo - Guarulhos (SBGR) e ao Aeroporto de São Paulo - Congonhas (SBSP), pois estes são dois dos aeroportos mais movimentados do Brasil [48].

As FCA's foram colocadas cerca de aproximadamente 300 km de distância dos aeroportos para que se pudesse ter uma margem de 35 a 45 minutos entre a entrada das aeronaves nas FCA's e a chegada ao aeroporto.

Diante da localização das FCA's, escolheram-se os voos que tivessem por origem os principais aeroportos das regiões norte, nordeste e centro-oeste, tendo como destino os aeroportos SBGR e SBSP. Foi escolhido apenas um aeroporto da região sudeste, pois a distância desses aeroportos para as FCA's seria muito curta e não foram escolhidos voos da região sul para simplificação do estudo.

Para os voos de exceção, foram escolhidos 3 voos fora dos aeroportos do Brasil de forma que seus voos por terem a duração muito longa pudessem ser tratados como exceção para obterem o menor atraso possível.

No total, foram capturados voos de 20 aeroportos, sendo eles:

- **Região Nordeste:** Aeroporto Internacional de Fortaleza (SBFZ), Aeroporto de Teresina (SBTE), Aeroporto Internacional de Salvador (SBSV), Aeroporto Internacional do Recife (SBRF), Aeroporto Internacional de João Pessoa - Bayeux (SBJP), Aeroporto Internacional de São Gonçalo do Amarante - Natal (SBSG), Aeroporto de Aracaju - Santa Maria (SBAR), Aeroporto Internacional de Maceió - Zumbi dos Palmares (SBMO) e Aeroporto Internacional de São Luís (SBSL).
- **Região Centro-oeste:** Aeroporto Internacional de Brasília (SBBR), Aeroporto de Goiânia (SBGO), Aeroporto Internacional de Campo Grande (SBCG) e Aeroporto Internacional de Cuiabá (SBCY).
- **Região Norte:** Aeroporto Internacional de Manaus (SBEG), Aeroporto de Palmas (SBPJ) e Aeroporto Internacional de Belém (SBBE).

- **Região Sudeste:** Aeroporto Internacional de Belo Horizonte - Confins (SBCF).
- **Fora do Brasil:** Aeroporto Internacional de Miami (KMIA), Aeroporto Internacional de Orlando (KMCO) e Aeroporto Internacional Oliver Tambo - África do Sul (FAOR).

A Figura 6.1 mostra o mapa do Brasil com as duas FCA's, os 17 aeroportos brasileiros utilizados, além de SBGR e SBSP.



Figura 6.1: Mapa do Brasil com as FCA's e os Aeroportos Utilizados (Adaptada) [13].

Foi escolhido o período de tempo que abrangesse os voos desses 20 aeroportos com destino a SBGR e SBSP das 16 às 23 horas devido ao período do final da tarde até a noite possuírem mais movimentações. No total, foram selecionados 123 voos desses aeroportos durante esse período de tempo.

Como as rotas dos aviões são limitadas, foi assumido que apenas é possível passar uma aeronave por FCA no período de 10 minutos como é mostrado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Capacidade por Período em cada FCA durante o CTOP

FCA	Período	Capacidade
FCA1	10 minutos	1 aeronave
FCA2	10 minutos	1 aeronave

Para as fases do algoritmo do CTOP que possuem sorteio, foram utilizadas as seguintes configurações:

- **Sorteio dos *slots* disponíveis nas FCA's:** como só pode passar uma aeronave a cada 10 minutos, o sorteio foi feito da seguinte forma: 1 hora equivaleria a 6 voos, logo, como o período dos *slots* é das 16h às 23h, seriam sorteados para 7 horas cerca de 42 *slots* por FCA e, como foram usadas 2 FCA's, totalizariam 84 *slots*.

O total de *slots* disponíveis foi propositalmente escolhido de forma que fosse menor que a quantidade de voos, que foram 123, para simular o cenário de congestionamento aéreo em que se tem mais voos que *slots* disponíveis, o que ocorre quando se tem situações adversas no tráfego aéreo.

Para garantir que houvesse a separação mínima 2 minutos entre as aeronaves, citada na seção de Gerenciamento do Tráfego Aéreo, adicionou-se essa condição ao algoritmo. Por exemplo, para o sorteio dos *slots* com início às 17 horas, se um *slot* fosse de 17:09, o próximo *slot* deveria ser no mínimo 17:11.

- **Sorteio dos *slots* dos voos para entrarem nas FCA's (EAT):** como a FCA foi colocada a cerca de 35 a 45 minutos dos aeroportos de destino, para gerar os *slots* dos voos, pegou-se o horário dos voos de chegada nos aeroportos e subtraiu-se por um número aleatório entre 35 e 45 para definir o horário de chegada na FCA.
- **Sorteio da distribuição dos voos:** sortearam-se os voos para as companhias aéreas nas porcentagens de 50%/50%, 67%/33% e 75%/25%. Dessa forma, obtiveram-se 61 voos para uma companhia aérea e 62 voos para a outra companhia no caso 50%/50%, 82 e 41 voos para o caso 67%/33% e 93 e 30 para o caso 75%/25%.
- **Sorteio dos voos prioritários:** definiu-se que os voos prioritários seriam sorteados para serem 30% do total de todos os voos de cada companhia aérea.

### 6.2.2 Condições Iniciais para a Negociação com Teoria dos Jogos

Para a negociação com Teoria dos Jogos foi utilizado a lista final de voos alocados pelo CTOP. Assumiu-se que a companhia aérea não possuía conhecimento dos voos da companhia concorrente, mas ela sabia quais eram os *slots* do CTOP.

A partir do momento que o algoritmo do CTOP é executado, as companhias aéreas disputam entre si a troca dos *slots* gerados pelo CTOP.

Como na primeira execução do algoritmo não existe ainda um histórico de rodadas, as companhias baseiam suas escolhas de aceitação e rejeição sem considerar o histórico, apenas as seguintes regras:

- O jogo é composto pela tentativa de negociação dos *slots* separados pelas janelas de tempo de 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22 horas.
- Durante cada janela de tempo é possível ter no máximo 4 rodadas.
- A *CompanhiaA* sempre inicia o jogo.
- As negociações têm necessariamente por objetivo de reduzir o atraso prioritário e global ou apenas um deles. Caso a companhia aérea que analisa a negociação não tenha nenhuma dessas opções satisfeita, a negociação é imediatamente rejeitada.
- Se o atraso prioritário da companhia aérea que recebe a negociação sofre redução de no mínimo 15% e um atraso global aumentado de até no máximo 10%, aceita-se a negociação e o jogo termina para aquela janela de tempo. Caso contrário, uma nova negociação é feita.
- Se o atraso global da companhia aérea que recebe a negociação sofre uma redução de no mínimo 10% e um atraso prioritário aumentado de até no máximo 10%, aceita-se a negociação e o jogo termina para aquela janela de tempo. Caso contrário, uma nova negociação é feita.
- A partir do momento que se tem uma aceitação, efetua-se a troca dos *slots* correspondentes à negociação realizada, coloca-os na lista final dos jogos e negocia-se a próxima janela de tempo.
- Se em 4 rodadas não tiver nenhuma aceitação, mantém-se os *slots* da lista final do CTOP para aquela janela de tempo e negocia-se a próxima janela de tempo.
- Após a última janela de tempo, finaliza-se o jogo e o resultado é a lista final gerada pelo jogo.

Considerando que já se executou pelo menos uma vez o algoritmo para todas as janelas de tempo, as próximas rodadas só podem ser analisadas após a verificação de todo o

histórico de rodadas anteriores e, além das regras citadas anteriormente, são incluídas as seguintes regras:

- Se a percentagem de rejeição das negociações por rodada da companhia aérea concorrente for maior que 70% e a percentagem de rejeição das negociações por rodada da companhia que está jogando no momento for menor que 85%, imediatamente nega-se a negociação.
- Se a percentagem de rejeição das negociações por rodada da companhia aérea concorrente for menor ou igual a 70% ou a percentagem de rejeição das negociações por rodada da companhia que está jogando no momento for maior ou igual a 85% analisa-se a jogada baseada nas regras citadas anteriormente.

As regras têm por função definir de modo claro e conciso como cada companhia aérea pode se comportar no jogo e foram elaboradas visando a cooperação das companhias para que ambas possam se beneficiar da redução dos atrasos.

Além disso, o uso de porcentagens específicas e recompensas foram adicionadas na tentativa de promover um jogo mais “justo”, pois, se uma companhia aérea só rejeita as negociações da companhia concorrente, ela deve ser penalizada tendo as suas negociações rejeitadas e o modo de parar com a rejeição é aceitar as propostas da companhia concorrente.

## 6.3 Execução

Para a execução e validação de cada estudo de caso, determinou-se que o algoritmo do CTOP com a Negociação por Teoria dos Jogos seria executado 100 vezes para cada caso.

O intuito é que, com a grande quantidade de repetições, forme-se um jogo repetido, ou seja, um jogo com sucessivas repetições em que permita que todos os possíveis resultados ou pelo menos a maioria deles possam ser expressos no jogo, além de poder detectar possíveis resultados atípicos ou inconsistentes e ter a perspectiva de como o algoritmo age de forma geral.

Para a repetição do algoritmo estabeleceu-se que a definição geográfica das FCA's, os horários de atuação do CTOP e os voos continuariam os mesmos, exceto pela distribuição dos voos pelas companhias aéreas que mudaria pra cada caso.

Entretanto, devido aos sorteios que acontecem no algoritmo como os parâmetros dos *slots* disponíveis pelas FCA's, os *slots* de EAT de cada voo, a distribuição dos voos para as companhias aéreas e a atribuição de prioridade dos voos, cada um desses parâmetros recebem novos valores a cada execução do algoritmo.

Para a validação do estudo, foi selecionada aleatoriamente uma demanda para a aplicação do algoritmo do CTOP com a Negociação por Teoria dos Jogos.

Foram utilizados 123 voos com destino a SBGR e SBSP que ocorreram durante o período das 17 às 23 horas, tendo 120 voos com as prioridades definidas como "N" para voos normais e 3 voos com prioridade "H" para voos com alta prioridade, os voos de exceção que podem ser vistos na Tabela A.1 no **Apêndice A**.

Os *slots* disponíveis para receber os voos foram sorteados e constam na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: *Slots* Disponíveis

<b>Janela de Tempo</b>	<b>Slots Disponíveis</b>	
	<b>FCA1</b>	<b>FCA2</b>
<b>16:00</b>	16:07, 16:14, 16:27, 16:36, 16:40, 16:52	16:09, 16:18, 16:28, 16:35, 16:41, 16:53
<b>17:00</b>	17:09, 17:13, 17:25, 17:35, 17:40, 17:56	17:05, 17:16, 17:24, 17:32, 17:46, 17:53
<b>18:00</b>	18:06, 18:18, 18:21, 18:34, 18:44, 18:53	18:04, 18:16, 18:23, 18:35, 18:46, 18:50
<b>19:00</b>	19:05, 19:16, 19:22, 19:36, 19:46, 19:56	19:04, 19:18, 19:24, 19:34, 19:43, 19:53
<b>20:00</b>	20:08, 20:16, 20:23, 20:34, 20:44, 20:50	20:07, 20:15, 20:25, 20:37, 20:40, 20:55
<b>21:00</b>	21:09, 21:18, 21:24, 21:31, 21:44, 21:53	21:06, 21:15, 21:26, 21:36, 21:45, 21:55
<b>22:00</b>	22:06, 22:18, 22:22, 22:35, 22:44, 22:52	22:04, 22:16, 22:27, 22:37, 22:40, 22:55

Cada voo tem um horário de EAT e um horário IAT. Os horários de EAT são sorteados para serem valores entre 35 e 45 minutos a menos que os horários de destino dos voos devido a localização das FCAs e o horário de IAT é o menor valor entre os dois valores de EAT.

A Tabela 6.4 mostra a tabela ordenada por IAT e com os valores de EAT apenas para a janela de tempo das 19 horas para simplificação.



Tabela 6.4: EAT dos Voos Ordenados por IAT

ID	EAT-FCA1	EAT-FCA2	IAT-FCA1	IAT-FCA2
A59	19:09:00	19:00:00		19:00:00
A61	19:05:00	19:10:00	19:05:00	
A62	19:15:00	19:07:00		19:07:00
A60	19:07:00	19:08:00	19:07:00	
A58	19:08:00	19:10:00	19:08:00	
A64	19:18:00	19:21:00	19:18:00	
A63	19:24:00	19:19:00		19:19:00
A66	19:28:00	19:36:00	19:28:00	
A65	19:34:00	19:32:00		19:32:00
A67	19:32:00	19:38:00	19:32:00	
A68	19:32:00	19:35:00	19:32:00	
A69	19:35:00	19:38:00	19:35:00	
A70	19:45:00	19:38:00		19:38:00
A72	19:50:00	19:42:00		19:42:00
A71	19:49:00	19:45:00		19:45:00
A74	19:54:00	19:51:00		19:51:00
A75	19:51:00	19:55:00	19:51:00	
A73	19:55:00	19:53:00		19:53:00

Inicialmente, a lista final do algoritmo do CTOP é gerada ao alocar os voos de exceção de acordo os *slots* disponíveis e pode ser visualizada na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Resultado do CTOP para os Voos de Exceção

ID	Companhia	EAT-FCA1	EAT-FCA2	FCA	Slot	Atraso
A16	companhiaB	17:02:00	17:03:00	fca2	17:05:00	0:02:00
A46	companhiaB	18:28:00	18:32:00	fca2	18:35:00	0:03:00
A88	companhiaA	20:32:00	20:39:00	fca2	20:40:00	0:01:00

Os demais voos são alocados de acordo com a ordenação por IAT e menor tempo de atraso como mostrado na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Resultado do CTOP para Voos Normais

ID	Companhia	EAT-FCA1	EAT-FCA2	FCA	Slot	Atraso
A3	companhiaA	16:24:00	16:28:00	fca1	16:27:00	0:03:00
A1	companhiaB	16:22:00	16:23:00	fca2	16:28:00	0:05:00
A2	companhiaB	16:21:00	16:29:00	fca2	16:35:00	0:06:00
A4	companhiaB	16:33:00	16:26:00	fca1	16:36:00	0:03:00
A5	companhiaB	16:34:00	16:29:00	fca1	16:40:00	0:06:00
A6	companhiaB	16:34:00	16:35:00	fca2	16:41:00	0:06:00

A10	companhiaA	16:41:00	16:48:00	fca1	16:52:00	0:11:00
A8	companhiaB	16:38:00	16:42:00	fca2	16:53:00	0:11:00
A7	companhiaB	16:45:00	16:44:00	fca1	17:09:00	0:24:00
A9	companhiaA	16:45:00	16:46:00	fca1	17:13:00	0:28:00
A11	companhiaA	16:49:00	16:53:00	fca2	17:16:00	0:23:00
A13	companhiaA	16:51:00	16:55:00	fca2	17:24:00	0:29:00
A14	companhiaB	16:51:00	16:52:00	fca1	17:25:00	0:34:00
A15	companhiaA	16:59:00	16:57:00	fca2	17:32:00	0:35:00
A12	companhiaA	16:59:00	16:52:00	fca1	17:35:00	0:36:00
A20	companhiaB	17:07:00	17:01:00	fca1	17:40:00	0:33:00
A19	companhiaA	17:00:00	17:09:00	fca2	17:46:00	0:37:00
A18	companhiaA	17:02:00	17:06:00	fca2	17:53:00	0:47:00
A17	companhiaA	17:06:00	17:04:00	fca1	17:56:00	0:50:00
A21	companhiaB	17:11:00	17:15:00	fca2	18:04:00	0:49:00
A24	companhiaA	17:29:00	17:22:00	fca1	18:06:00	0:37:00
A22	companhiaA	17:25:00	17:23:00	fca2	18:16:00	0:53:00
A25	companhiaA	17:25:00	17:32:00	fca1	18:18:00	0:53:00
A26	companhiaA	17:38:00	17:28:00	fca1	18:21:00	0:43:00
A23	companhiaA	17:23:00	17:28:00	fca2	18:23:00	0:55:00
A27	companhiaA	17:38:00	17:33:00	fca1	18:34:00	0:56:00
A28	companhiaB	17:39:00	17:34:00	fca1	18:44:00	1:05:00
A29	companhiaA	17:37:00	17:44:00	fca2	18:46:00	1:02:00
A30	companhiaB	17:42:00	17:40:00	fca2	18:50:00	1:10:00
A31	companhiaB	17:43:00	17:49:00	fca1	18:53:00	1:10:00
A33	companhiaB	17:50:00	17:57:00	fca2	19:04:00	1:07:00
A32	companhiaB	17:56:00	17:46:00	fca1	19:05:00	1:09:00
A36	companhiaB	18:06:00	18:00:00	fca1	19:16:00	1:10:00
A34	companhiaB	17:52:00	17:59:00	fca2	19:18:00	1:19:00
A37	companhiaB	18:08:00	18:04:00	fca1	19:22:00	1:14:00
A35	companhiaB	17:55:00	18:03:00	fca2	19:24:00	1:21:00
A39	companhiaA	18:08:00	18:10:00	fca2	19:34:00	1:24:00
A38	companhiaA	18:11:00	18:12:00	fca1	19:36:00	1:25:00
A40	companhiaA	18:12:00	18:11:00	fca2	19:43:00	1:32:00
A41	companhiaA	18:22:00	18:14:00	fca1	19:46:00	1:24:00
A42	companhiaB	18:23:00	18:21:00	fca2	19:53:00	1:32:00

A45	companhiaB	18:24:00	18:31:00	fca1	19:56:00	1:32:00
A44	companhiaB	18:26:00	18:28:00	fca2	20:07:00	1:39:00
A43	companhiaA	18:29:00	18:28:00	fca1	20:08:00	1:39:00
A47	companhiaA	18:31:00	18:35:00	fca2	20:15:00	1:40:00
A49	companhiaA	18:34:00	18:33:00	fca1	20:16:00	1:42:00
A50	companhiaB	18:38:00	18:40:00	fca1	20:23:00	1:45:00
A48	companhiaA	18:34:00	18:39:00	fca2	20:25:00	1:46:00
A51	companhiaA	18:41:00	18:43:00	fca1	20:34:00	1:53:00
A52	companhiaB	18:43:00	18:42:00	fca2	20:37:00	1:55:00
A53	companhiaA	18:58:00	18:54:00	fca1	20:44:00	1:46:00
A55	companhiaB	19:04:00	18:56:00	fca1	20:50:00	1:46:00
A54	companhiaB	19:03:00	18:57:00	fca2	20:55:00	1:58:00
A56	companhiaA	19:02:00	18:59:00	fca2	21:06:00	2:07:00
A57	companhiaB	19:02:00	18:58:00	fca1	21:09:00	2:07:00
A61	companhiaB	19:05:00	19:10:00	fca2	21:15:00	2:05:00
A59	companhiaA	19:09:00	19:00:00	fca1	21:18:00	2:09:00
A62	companhiaB	19:15:00	19:07:00	fca1	21:24:00	2:09:00
A60	companhiaB	19:07:00	19:08:00	fca2	21:26:00	2:18:00
A58	companhiaB	19:08:00	19:10:00	fca1	21:31:00	2:23:00
A64	companhiaA	19:18:00	19:21:00	fca2	21:36:00	2:15:00
A63	companhiaB	19:24:00	19:19:00	fca1	21:44:00	2:20:00
A66	companhiaA	19:28:00	19:36:00	fca2	21:45:00	2:09:00
A65	companhiaA	19:34:00	19:32:00	fca1	21:53:00	2:19:00
A67	companhiaA	19:32:00	19:38:00	fca2	21:55:00	2:17:00
A68	companhiaA	19:32:00	19:35:00	fca2	22:04:00	2:29:00
A69	companhiaB	19:35:00	19:38:00	fca1	22:06:00	2:31:00
A71	companhiaA	19:49:00	19:45:00	fca2	22:16:00	2:31:00
A70	companhiaA	19:45:00	19:38:00	fca1	22:18:00	2:33:00
A72	companhiaA	19:50:00	19:42:00	fca1	22:22:00	2:32:00
A74	companhiaB	19:54:00	19:51:00	fca2	22:27:00	2:36:00
A73	companhiaB	19:55:00	19:53:00	fca1	22:35:00	2:40:00
A75	companhiaA	19:51:00	19:55:00	fca2	22:37:00	2:42:00
A77	companhiaB	20:07:00	20:02:00	fca2	22:40:00	2:38:00
A79	companhiaA	20:10:00	20:01:00	fca1	22:44:00	2:34:00
A78	companhiaA	20:04:00	20:05:00	fca1	22:52:00	2:48:00

A76	companhiaB	20:06:00	20:05:00	fca2	22:55:00	2:50:00
-----	------------	----------	----------	------	----------	---------

Como os *slots* disponíveis são menores que o total de voos, não são todos os voos que recebem *slots*. Os voos que não têm nenhum *slot* atribuído são classificados como NOSLOT, pois não podem voar pela FCA já que não há nenhum horário disponível e devem voar por fora da FCA. A tabela com os voos sem *slot* são mostrados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7: Resultado do CTOP para Voos sem *Slot*

ID	Companhia	EAT-FCA1	EAT-FCA2	FCA
A112	companhiaB	21:43:00	21:47:00	NOSLOT
A105	companhiaA	21:23:00	21:27:00	NOSLOT
A108	companhiaB	21:31:00	21:28:00	NOSLOT
A107	companhiaB	21:30:00	21:28:00	NOSLOT
A106	companhiaA	21:33:00	21:30:00	NOSLOT
A110	companhiaA	21:35:00	21:42:00	NOSLOT
A109	companhiaB	21:36:00	21:40:00	NOSLOT
A111	companhiaA	21:41:00	21:36:00	NOSLOT
A121	companhiaA	22:12:00	22:11:00	NOSLOT
A113	companhiaA	21:48:00	21:47:00	NOSLOT
A114	companhiaA	21:53:00	21:55:00	NOSLOT
A115	companhiaB	21:57:00	21:59:00	NOSLOT
A118	companhiaA	21:59:00	22:01:00	NOSLOT
A116	companhiaB	22:02:00	22:00:00	NOSLOT
A117	companhiaA	22:02:00	22:03:00	NOSLOT
A119	companhiaB	22:05:00	22:07:00	NOSLOT
A120	companhiaB	22:09:00	22:06:00	NOSLOT
A103	companhiaA	21:16:00	21:21:00	NOSLOT
A122	companhiaB	22:12:00	22:17:00	NOSLOT
A104	companhiaA	21:18:00	21:23:00	NOSLOT
A94	companhiaB	20:53:00	20:51:00	NOSLOT
A102	companhiaB	21:15:00	21:22:00	NOSLOT
A89	companhiaA	20:35:00	20:32:00	NOSLOT
A80	companhiaB	20:10:00	20:12:00	NOSLOT
A81	companhiaA	20:13:00	20:17:00	NOSLOT
A82	companhiaB	20:17:00	20:15:00	NOSLOT
A84	companhiaB	20:20:00	20:24:00	NOSLOT

A83	companhiaA	20:25:00	20:24:00	NOSLOT
A85	companhiaB	20:31:00	20:26:00	NOSLOT
A86	companhiaB	20:29:00	20:33:00	NOSLOT
A87	companhiaA	20:29:00	20:36:00	NOSLOT
A90	companhiaA	20:40:00	20:32:00	NOSLOT
A101	companhiaB	21:15:00	21:17:00	NOSLOT
A92	companhiaB	20:40:00	20:47:00	NOSLOT
A91	companhiaA	20:43:00	20:40:00	NOSLOT
A93	companhiaA	20:53:00	20:54:00	NOSLOT
A95	companhiaB	20:54:00	20:55:00	NOSLOT
A96	companhiaB	20:57:00	20:56:00	NOSLOT
A97	companhiaB	21:02:00	20:57:00	NOSLOT
A98	companhiaB	21:06:00	21:00:00	NOSLOT
A99	companhiaB	21:08:00	21:01:00	NOSLOT
A100	companhiaA	21:16:00	21:10:00	NOSLOT
A123	companhiaA	22:21:00	22:18:00	NOSLOT

A etapa da negociação entre as companhias aéreas utilizando Teoria dos Jogos inicia-se com o sorteio dos voos prioritários das companhias já que os jogos consistem na tentativa de redução do atrasos dos voos normais e prioritários. A Tabela 6.10 contém os voos prioritários da *CompanhiaA* e a Tabela 6.11 contém os voos prioritários da *CompanhiaB*.

O total de atraso das companhias aéreas após o CTOP é:

- Atraso global da *CompanhiaA* é 3514 minutos como mostra a Tabela 6.8.
- Atraso global da *CompanhiaB* é 3146 minutos como mostra a Tabela 6.9.
- Atraso prioritário da *CompanhiaA* é 827 minutos como mostra a Tabela 6.10.
- Atraso prioritário da *CompanhiaB* é 652 minutos como mostra a Tabela 6.11.

Tabela 6.8: Atraso Global da *CompanhiaA*

ID	Companhia	EAT-FCA1	EAT-FCA2	FCA	Slot	Atraso
A3	companhiaA	16:24:00	16:28:00	fca1	16:27:00	0:03:00
A10	companhiaA	16:41:00	16:48:00	fca1	16:52:00	0:11:00
A9	companhiaA	16:45:00	16:46:00	fca1	17:13:00	0:28:00
A11	companhiaA	16:49:00	16:53:00	fca2	17:16:00	0:23:00
A13	companhiaA	16:51:00	16:55:00	fca2	17:24:00	0:29:00
A15	companhiaA	16:59:00	16:57:00	fca2	17:32:00	0:35:00
A12	companhiaA	16:59:00	16:52:00	fca1	17:35:00	0:36:00
A19	companhiaA	17:00:00	17:09:00	fca2	17:46:00	0:37:00
A18	companhiaA	17:02:00	17:06:00	fca2	17:53:00	0:47:00
A17	companhiaA	17:06:00	17:04:00	fca1	17:56:00	0:50:00
A24	companhiaA	17:29:00	17:22:00	fca1	18:06:00	0:37:00
A22	companhiaA	17:25:00	17:23:00	fca2	18:16:00	0:53:00
A25	companhiaA	17:25:00	17:32:00	fca1	18:18:00	0:53:00
A26	companhiaA	17:38:00	17:28:00	fca1	18:21:00	0:43:00
A23	companhiaA	17:23:00	17:28:00	fca2	18:23:00	0:55:00
A27	companhiaA	17:38:00	17:33:00	fca1	18:34:00	0:56:00
A29	companhiaA	17:37:00	17:44:00	fca2	18:46:00	1:02:00
A39	companhiaA	18:08:00	18:10:00	fca2	19:34:00	1:24:00
A38	companhiaA	18:11:00	18:12:00	fca1	19:36:00	1:25:00
A40	companhiaA	18:12:00	18:11:00	fca2	19:43:00	1:32:00
A41	companhiaA	18:22:00	18:14:00	fca1	19:46:00	1:24:00
A43	companhiaA	18:29:00	18:28:00	fca1	20:08:00	1:39:00
A47	companhiaA	18:31:00	18:35:00	fca2	20:15:00	1:40:00
A49	companhiaA	18:34:00	18:33:00	fca1	20:16:00	1:42:00
A48	companhiaA	18:34:00	18:39:00	fca2	20:25:00	1:46:00
A51	companhiaA	18:41:00	18:43:00	fca1	20:34:00	1:53:00
A53	companhiaA	18:58:00	18:54:00	fca1	20:44:00	1:46:00
A56	companhiaA	19:02:00	18:59:00	fca2	21:06:00	2:07:00
A59	companhiaA	19:09:00	19:00:00	fca1	21:18:00	2:09:00
A64	companhiaA	19:18:00	19:21:00	fca2	21:36:00	2:15:00
A66	companhiaA	19:28:00	19:36:00	fca2	21:45:00	2:09:00
A65	companhiaA	19:34:00	19:32:00	fca1	21:53:00	2:19:00
A67	companhiaA	19:32:00	19:38:00	fca2	21:55:00	2:17:00
A68	companhiaA	19:32:00	19:35:00	fca2	22:04:00	2:29:00
A71	companhiaA	19:49:00	19:45:00	fca2	22:16:00	2:31:00
A70	companhiaA	19:45:00	19:38:00	fca1	22:18:00	2:33:00
A72	companhiaA	19:50:00	19:42:00	fca1	22:22:00	2:32:00
A75	companhiaA	19:51:00	19:55:00	fca2	22:37:00	2:42:00
A79	companhiaA	20:10:00	20:01:00	fca1	22:44:00	2:34:00
A78	companhiaA	20:04:00	20:05:00	fca1	22:52:00	2:48:00
<b>Total</b>						<b>3514 minutos</b>

Tabela 6.9: Atraso Global da *CompanhiaB*

ID	Companhia	EAT-FCA1	EAT-FCA2	FCA	Slot	Atraso
A1	companhiaB	16:22:00	16:23:00	fca2	16:28:00	0:05:00
A2	companhiaB	16:21:00	16:29:00	fca2	16:35:00	0:06:00
A4	companhiaB	16:33:00	16:26:00	fca1	16:36:00	0:03:00
A5	companhiaB	16:34:00	16:29:00	fca1	16:40:00	0:06:00
A6	companhiaB	16:34:00	16:35:00	fca2	16:41:00	0:06:00
A8	companhiaB	16:38:00	16:42:00	fca2	16:53:00	0:11:00
A7	companhiaB	16:45:00	16:44:00	fca1	17:09:00	0:24:00
A14	companhiaB	16:51:00	16:52:00	fca1	17:25:00	0:34:00
A20	companhiaB	17:07:00	17:01:00	fca1	17:40:00	0:33:00
A21	companhiaB	17:11:00	17:15:00	fca2	18:04:00	0:49:00
A28	companhiaB	17:39:00	17:34:00	fca1	18:44:00	1:05:00
A30	companhiaB	17:42:00	17:40:00	fca2	18:50:00	1:10:00
A31	companhiaB	17:43:00	17:49:00	fca1	18:53:00	1:10:00
A33	companhiaB	17:50:00	17:57:00	fca2	19:04:00	1:07:00
A32	companhiaB	17:56:00	17:46:00	fca1	19:05:00	1:09:00
A36	companhiaB	18:06:00	18:00:00	fca1	19:16:00	1:10:00
A34	companhiaB	17:52:00	17:59:00	fca2	19:18:00	1:19:00
A37	companhiaB	18:08:00	18:04:00	fca1	19:22:00	1:14:00
A35	companhiaB	17:55:00	18:03:00	fca2	19:24:00	1:21:00
A42	companhiaB	18:23:00	18:21:00	fca2	19:53:00	1:32:00
A45	companhiaB	18:24:00	18:31:00	fca1	19:56:00	1:32:00
A44	companhiaB	18:26:00	18:28:00	fca2	20:07:00	1:39:00
A50	companhiaB	18:38:00	18:40:00	fca1	20:23:00	1:45:00
A52	companhiaB	18:43:00	18:42:00	fca2	20:37:00	1:55:00
A55	companhiaB	19:04:00	18:56:00	fca1	20:50:00	1:46:00
A54	companhiaB	19:03:00	18:57:00	fca2	20:55:00	1:58:00
A57	companhiaB	19:02:00	18:58:00	fca1	21:09:00	2:07:00
A61	companhiaB	19:05:00	19:10:00	fca2	21:15:00	2:05:00
A62	companhiaB	19:15:00	19:07:00	fca1	21:24:00	2:09:00
A60	companhiaB	19:07:00	19:08:00	fca2	21:26:00	2:18:00
A58	companhiaB	19:08:00	19:10:00	fca1	21:31:00	2:23:00
A63	companhiaB	19:24:00	19:19:00	fca1	21:44:00	2:20:00
A69	companhiaB	19:35:00	19:38:00	fca1	22:06:00	2:31:00
A74	companhiaB	19:54:00	19:51:00	fca2	22:27:00	2:36:00
A73	companhiaB	19:55:00	19:53:00	fca1	22:35:00	2:40:00
A77	companhiaB	20:07:00	20:02:00	fca2	22:40:00	2:38:00
A76	companhiaB	20:06:00	20:05:00	fca2	22:55:00	2:50:00
<b>Total</b>						<b>3146 minutos</b>

Tabela 6.10: Atraso Prioritário da *CompanhiaA*

ID	Companhia	EAT-FCA1	EAT-FCA2	FCA	Slot	Atraso
A19	companhiaA	17:00:00	17:09:00	fca2	17:46:00	0:37:00
A18	companhiaA	17:02:00	17:06:00	fca2	17:53:00	0:47:00
A22	companhiaA	17:25:00	17:23:00	fca2	18:16:00	0:53:00
A29	companhiaA	17:37:00	17:44:00	fca2	18:46:00	1:02:00
A41	companhiaA	18:22:00	18:14:00	fca1	19:46:00	1:24:00
A43	companhiaA	18:29:00	18:28:00	fca1	20:08:00	1:39:00
A66	companhiaA	19:28:00	19:36:00	fca2	21:45:00	2:09:00
A75	companhiaA	19:51:00	19:55:00	fca2	22:37:00	2:42:00
A79	companhiaA	20:10:00	20:01:00	fca1	22:44:00	2:34:00
<b>Total</b>						<b>827 minutos</b>

Tabela 6.11: Atraso Prioritário da *CompanhiaB*

ID	Companhia	EAT-FCA1	EAT-FCA2	FCA	Slot	Atraso
A4	companhiaB	16:33:00	16:26:00	fca1	16:36:00	0:03:00
A31	companhiaB	17:43:00	17:49:00	fca1	18:53:00	1:10:00
A35	companhiaB	17:55:00	18:03:00	fca2	19:24:00	1:21:00
A45	companhiaB	18:24:00	18:31:00	fca1	19:56:00	1:32:00
A50	companhiaB	18:38:00	18:40:00	fca1	20:23:00	1:45:00
A58	companhiaB	19:08:00	19:10:00	fca1	21:31:00	2:23:00
A77	companhiaB	20:07:00	20:02:00	fca2	22:40:00	2:38:00
<b>Total</b>						<b>652 minutos</b>

Cada companhia aérea não tem conhecimento dos voos prioritários da companhia concorrente, mas cada companhia sabe o horário dos *slots* do CTOP. Logo, as companhias negociam entre si na tentativa de reduzir seus atrasos, fazendo jogadas que troquem seus voos de maior prioridade com melhores *slots* disponíveis pelo CTOP.

A Tabela 6.12 mostra o histórico de jogadas das companhias aéreas, tendo a **Origem** da companhia que fez a proposta, **Destino** como a companhia que recebeu a proposta.

Além disso, tem-se a **Rodada**, **Atual** como o *slot* atual da companhia, **Proposta** como o *slot* para fazer a negociação, **AG(%)** e **AP(%)** como a porcentagem do atraso global e do atraso prioritário, sendo um valor positivo para uma proposta que diminua o atraso e um valor negativo para um aumento do atraso, e a **Resposta** para aceitação ou rejeição da proposta.

Tabela 6.12: Histórico do Jogo

Origem	Destino	Rodada	Atual	Proposta	AG (%)	AP (%)	Resposta
A	B	1	-	-	0	0	não



A	B	1	-	-	0	0	não
B	A	2	-	-	0	0	não
B	A	2	-	-	0	0	não
A	B	3	-	-	0	0	não
A	B	3	-	-	0	0	não
B	A	4	-	-	0	0	não
B	A	4	-	-	0	0	não
A	B	1	17:53:00	17:09:00	-29.6703	0	não
A	B	1	17:16:00	17:40:00	-29.6703	0	não
B	A	2	17:25:00	17:13:00	12.2807	0	sim
B	A	2	17:09:00	17:56:00	12.2807	0	sim
A	B	1	18:46:00	18:04:00	-3.93701	45.7143	sim
A	B	1	18:21:00	18:53:00	-3.93701	45.7143	sim
A	B	1	19:46:00	19:04:00	-3.20513	16.763	sim
A	B	1	19:34:00	19:56:00	-3.20513	16.763	sim
A	B	1	20:08:00	20:07:00	6.814	0	não
A	B	1	20:15:00	20:55:00	6.814	0	não
B	A	2	20:23:00	20:08:00	2.8754	-15.1515	não
B	A	2	20:07:00	20:44:00	2.8754	-15.1515	não
A	B	3	20:34:00	20:07:00	-2.57827	14.2857	não
A	B	3	20:08:00	20:23:00	-2.57827	14.2857	não
B	A	4	20:23:00	20:08:00	2.23642	-15.1515	não
B	A	4	20:07:00	20:34:00	2.23642	-15.1515	não
A	B	1	21:45:00	21:09:00	-0.872818	0	não
A	B	1	21:06:00	21:44:00	-0.872818	0	não
B	A	2	21:31:00	21:06:00	-2.13568	0	não
B	A	2	21:44:00	21:55:00	-2.13568	0	não
A	B	3	21:45:00	21:09:00	-1.62095	18.8811	sim
A	B	3	21:06:00	21:31:00	-1.62095	18.8811	sim
A	B	1	22:44:00	22:06:00	1.63522	0	não
A	B	1	22:04:00	22:55:00	1.63522	0	não
B	A	2	22:40:00	22:04:00	0.918274	0	não
B	A	2	22:06:00	22:52:00	0.918274	0	não
A	B	3	22:44:00	22:06:00	-0.251572	22.7848	sim
A	B	3	22:04:00	22:40:00	-0.251572	22.7848	sim

Após as jogadas, se as companhias aceitarem a troca dos *slots*, a lista final do CTOP é modificada com os *slots* negociados. A Tabela 6.13 mostra a tabela de negociação dos *slots* da *CompanhiaA* e a Tabela 6.14 mostra a tabela de negociação dos *slots* da *CompanhiaB*.

Tabela 6.13: Negociação de *Slots* da *CompanhiaA*

ID do Voo	Companhia	Prioridade	Slot Antigo	Slot Novo
A9	companhiaA	N	17:13:00	17:25:00
A17	companhiaA	N	17:56:00	17:09:00
A29	companhiaA	P	18:46:00	18:04:00
A26	companhiaA	N	18:21:00	18:53:00
A41	companhiaA	P	19:46:00	19:04:00
A39	companhiaA	N	19:34:00	19:56:00
A66	companhiaA	P	21:45:00	21:09:00
A56	companhiaA	N	21:06:00	21:31:00
A79	companhiaA	P	22:44:00	22:06:00
A68	companhiaA	N	22:04:00	22:40:00

Tabela 6.14: Negociação de *Slots* da *CompanhiaB*

ID do Voo	Companhia	Prioridade	Slot Antigo	Slot Novo
A14	companhiaB	N	17:25:00	17:13:00
A7	companhiaB	N	17:09:00	17:56:00
A21	companhiaB	N	18:04:00	18:46:00
A31	companhiaB	P	18:53:00	18:21:00
A33	companhiaB	N	19:04:00	19:46:00
A45	companhiaB	P	19:56:00	19:34:00
A57	companhiaB	N	21:09:00	21:45:00
A58	companhiaB	P	21:31:00	21:06:00
A69	companhiaB	N	22:06:00	22:44:00
A77	companhiaB	P	22:40:00	22:04:00

Com a troca de *slots* pelas companhias aéreas, os valores dos atrasos globais e prioritários mudam, tendo os seguintes resultados:

- Atraso global da *CompanhiaA* é 3451 minutos como mostra a Tabela 6.15.
- Atraso global da *CompanhiaB* é 3226 minutos como mostra a Tabela 6.16.
- Atraso prioritário da *CompanhiaA* é 685 minutos como mostra a Tabela 6.17.
- Atraso prioritário da *CompanhiaB* é 528 minutos como mostra a Tabela 6.18.

Tabela 6.15: Novo Atraso Global da *CompanhiaA*

ID	Companhia	EAT-FCA1	EAT-FCA2	FCA	Slot	Atraso
A3	companhiaA	16:24:00	16:28:00	fca1	16:27:00	0:03:00
A10	companhiaA	16:41:00	16:48:00	fca1	16:52:00	0:11:00
A17	companhiaA	17:06:00	17:04:00	fca1	17:09:00	0:03:00
A11	companhiaA	16:49:00	16:53:00	fca2	17:16:00	0:23:00
A13	companhiaA	16:51:00	16:55:00	fca2	17:24:00	0:29:00
A9	companhiaA	16:45:00	16:46:00	fca1	17:25:00	0:40:00
A15	companhiaA	16:59:00	16:57:00	fca2	17:32:00	0:35:00
A12	companhiaA	16:59:00	16:52:00	fca1	17:35:00	0:36:00
A19	companhiaA	17:00:00	17:09:00	fca2	17:46:00	0:37:00
A18	companhiaA	17:02:00	17:06:00	fca2	17:53:00	0:47:00
A29	companhiaA	17:37:00	17:44:00	fca2	18:04:00	0:20:00
A24	companhiaA	17:29:00	17:22:00	fca1	18:06:00	0:37:00
A22	companhiaA	17:25:00	17:23:00	fca2	18:16:00	0:53:00
A25	companhiaA	17:25:00	17:32:00	fca1	18:18:00	0:53:00
A23	companhiaA	17:23:00	17:28:00	fca2	18:23:00	0:55:00
A27	companhiaA	17:38:00	17:33:00	fca1	18:34:00	0:56:00
A26	companhiaA	17:38:00	17:28:00	fca1	18:53:00	1:15:00
A41	companhiaA	18:22:00	18:14:00	fca2	19:04:00	0:50:00
A38	companhiaA	18:11:00	18:12:00	fca1	19:36:00	1:25:00
A40	companhiaA	18:12:00	18:11:00	fca2	19:43:00	1:32:00
A39	companhiaA	18:08:00	18:10:00	fca1	19:56:00	1:48:00
A43	companhiaA	18:29:00	18:28:00	fca1	20:08:00	1:39:00
A47	companhiaA	18:31:00	18:35:00	fca2	20:15:00	1:40:00
A49	companhiaA	18:34:00	18:33:00	fca1	20:16:00	1:42:00
A48	companhiaA	18:34:00	18:39:00	fca2	20:25:00	1:46:00
A51	companhiaA	18:41:00	18:43:00	fca1	20:34:00	1:53:00
A53	companhiaA	18:58:00	18:54:00	fca1	20:44:00	1:46:00
A66	companhiaA	19:28:00	19:36:00	fca1	21:09:00	1:41:00
A59	companhiaA	19:09:00	19:00:00	fca1	21:18:00	2:09:00
A56	companhiaA	19:02:00	18:59:00	fca1	21:31:00	2:29:00
A64	companhiaA	19:18:00	19:21:00	fca2	21:36:00	2:15:00
A65	companhiaA	19:34:00	19:32:00	fca1	21:53:00	2:19:00
A67	companhiaA	19:32:00	19:38:00	fca2	21:55:00	2:17:00
A79	companhiaA	20:10:00	20:01:00	fca1	22:06:00	1:56:00
A71	companhiaA	19:49:00	19:45:00	fca2	22:16:00	2:31:00
A70	companhiaA	19:45:00	19:38:00	fca1	22:18:00	2:33:00
A72	companhiaA	19:50:00	19:42:00	fca1	22:22:00	2:32:00
A75	companhiaA	19:51:00	19:55:00	fca2	22:37:00	2:42:00
A68	companhiaA	19:32:00	19:35:00	fca2	22:40:00	3:05:00
A78	companhiaA	20:04:00	20:05:00	fca1	22:52:00	2:48:00
<b>Total</b>						<b>3451 minutos</b>

Tabela 6.16: Novo Atraso Global da *CompanhiaB*

ID	Companhia	EAT-FCA1	EAT-FCA2	FCA	Slot	Atraso
A1	companhiaB	16:22:00	16:23:00	fca2	16:28:00	0:05:00
A2	companhiaB	16:21:00	16:29:00	fca2	16:35:00	0:06:00
A4	companhiaB	16:33:00	16:26:00	fca1	16:36:00	0:03:00
A5	companhiaB	16:34:00	16:29:00	fca1	16:40:00	0:06:00
A6	companhiaB	16:34:00	16:35:00	fca2	16:41:00	0:06:00
A8	companhiaB	16:38:00	16:42:00	fca2	16:53:00	0:11:00
A14	companhiaB	16:51:00	16:52:00	fca1	17:13:00	0:22:00
A20	companhiaB	17:07:00	17:01:00	fca1	17:40:00	0:33:00
A7	companhiaB	16:45:00	16:44:00	fca1	17:56:00	1:11:00
A31	companhiaB	17:43:00	17:49:00	fca1	18:21:00	0:38:00
A28	companhiaB	17:39:00	17:34:00	fca1	18:44:00	1:05:00
A21	companhiaB	17:11:00	17:15:00	fca2	18:46:00	1:31:00
A30	companhiaB	17:42:00	17:40:00	fca2	18:50:00	1:10:00
A32	companhiaB	17:56:00	17:46:00	fca1	19:05:00	1:09:00
A36	companhiaB	18:06:00	18:00:00	fca1	19:16:00	1:10:00
A34	companhiaB	17:52:00	17:59:00	fca2	19:18:00	1:19:00
A37	companhiaB	18:08:00	18:04:00	fca1	19:22:00	1:14:00
A35	companhiaB	17:55:00	18:03:00	fca2	19:24:00	1:21:00
A45	companhiaB	18:24:00	18:31:00	fca2	19:34:00	1:03:00
A33	companhiaB	17:50:00	17:57:00	fca1	19:46:00	1:56:00
A42	companhiaB	18:23:00	18:21:00	fca2	19:53:00	1:32:00
A44	companhiaB	18:26:00	18:28:00	fca2	20:07:00	1:39:00
A50	companhiaB	18:38:00	18:40:00	fca1	20:23:00	1:45:00
A52	companhiaB	18:43:00	18:42:00	fca2	20:37:00	1:55:00
A55	companhiaB	19:04:00	18:56:00	fca1	20:50:00	1:46:00
A54	companhiaB	19:03:00	18:57:00	fca2	20:55:00	1:58:00
A58	companhiaB	19:08:00	19:10:00	fca2	21:06:00	1:56:00
A61	companhiaB	19:05:00	19:10:00	fca2	21:15:00	2:05:00
A62	companhiaB	19:15:00	19:07:00	fca1	21:24:00	2:09:00
A60	companhiaB	19:07:00	19:08:00	fca2	21:26:00	2:18:00
A63	companhiaB	19:24:00	19:19:00	fca1	21:44:00	2:20:00
A57	companhiaB	19:02:00	18:58:00	fca2	21:45:00	2:47:00
A77	companhiaB	20:07:00	20:02:00	fca2	22:04:00	2:02:00
A74	companhiaB	19:54:00	19:51:00	fca2	22:27:00	2:36:00
A73	companhiaB	19:55:00	19:53:00	fca1	22:35:00	2:40:00
A69	companhiaB	19:35:00	19:38:00	fca1	22:44:00	3:09:00
A76	companhiaB	20:06:00	20:05:00	fca2	22:55:00	2:50:00
<b>Total</b>						<b>3226 minutos</b>

Tabela 6.17: Novo Atraso Prioritário da *CompanhiaA*

ID	Companhia	EAT-FCA1	EAT-FCA2	FCA	Slot	Atraso
A19	companhiaA	17:00:00	17:09:00	fca2	17:46:00	0:37:00
A18	companhiaA	17:02:00	17:06:00	fca2	17:53:00	0:47:00
A29	companhiaA	17:37:00	17:44:00	fca2	18:04:00	0:20:00
A22	companhiaA	17:25:00	17:23:00	fca2	18:16:00	0:53:00
A41	companhiaA	18:22:00	18:14:00	fca2	19:04:00	0:50:00
A43	companhiaA	18:29:00	18:28:00	fca1	20:08:00	1:39:00
A66	companhiaA	19:28:00	19:36:00	fca1	21:09:00	1:41:00
A79	companhiaA	20:10:00	20:01:00	fca1	22:06:00	1:56:00
A75	companhiaA	19:51:00	19:55:00	fca2	22:37:00	2:42:00
<b>Total</b>						<b>685 minutos</b>

Tabela 6.18: Novo Atraso Prioritário da *CompanhiaB*

A4	companhiaB	16:33:00	16:26:00	fca1	16:36:00	0:03:00
A31	companhiaB	17:43:00	17:49:00	fca1	18:21:00	0:38:00
A35	companhiaB	17:55:00	18:03:00	fca2	19:24:00	1:21:00
A45	companhiaB	18:24:00	18:31:00	fca2	19:34:00	1:03:00
A50	companhiaB	18:38:00	18:40:00	fca1	20:23:00	1:45:00
A58	companhiaB	19:08:00	19:10:00	fca2	21:06:00	1:56:00
A77	companhiaB	20:07:00	20:02:00	fca2	22:04:00	2:02:00
<b>Total</b>						<b>528 minutos</b>

Ao fazer a comparação do resultado com o algoritmo do CTOP e o algoritmo com Teoria dos Jogos para essa amostra, observa-se uma significativa diminuição do atraso prioritário com Jogos e uma diminuição do atraso global para a *CompanhiaA* enquanto, para a *CompanhiaB*, obteve-se um sutil aumento do atraso global.

## 6.4 Resultados

Os resultados foram obtidos a partir da execução de 100 vezes do algoritmo do CTOP com a negociação por Teoria dos Jogos para os casos desse estudo e mostram os valores de atraso global e prioritário da *CompanhiaA* e *CompanhiaB*.

### 6.4.1 Caso 1: 50%B e 50%A

O caso 50%/50% ocorreu com 61 voos para a *CompanhiaA* e 62 voos para a *CompanhiaB*. Os gráficos a seguir mostram os resultados para esse caso.

A Figura 6.2 mostra o atraso global da *CompanhiaA* para a execução do algoritmo do CTOP e dos Jogos. Observa-se que em vários dias os valores são muito similares do CTOP com os Jogos.

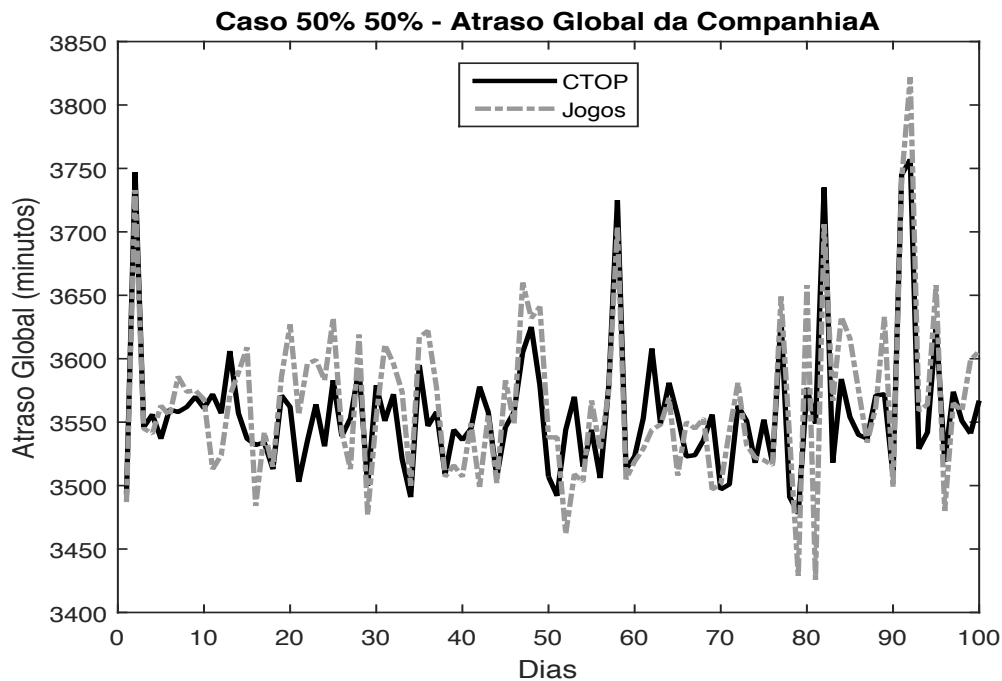


Figura 6.2: Atraso Global da *CompanhiaA* .

O valor mais baixo de atraso global foi encontrado pelo algoritmo de Jogos que corresponde a 3426 minutos no dia 81, assim como, o valor mais alto, que foi 3822 minutos no dia 92.

A Figura 6.3 contém os valores de atraso global para a *CompanhiaB*. Nota-se que os atrasos têm também comportamento semelhante tanto para o CTOP como para Jogos.

O maior valor de atraso global da *CompanhiaB* é 3535 minutos no dia 81 por Jogos e o menor valor é 2969 minutos no dia 96 pelo CTOP.

A Figura 6.4 mostra o atraso prioritário da *CompanhiaA*. O atraso prioritário por Jogos destaca-se com valores bem abaixo do CTOP, tendo apenas 4 dias em que o valor do CTOP foi menor que o de Jogos.

No dia 53 de atraso prioritário da *CompanhiaA*, obteve-se cerca de 24% menos atraso por Jogos do que pelo CTOP.

No entanto, a *CompanhiaB* não apresentou resultados tão abaixo dos valores do CTOP para Jogos, os quais são mostrados na Figura 6.5, mas continuam tendo atrasos prioritários por Jogos menores que pelo CTOP como no dia 14 em que obteve-se cerca de 23% menos atraso por Jogos.

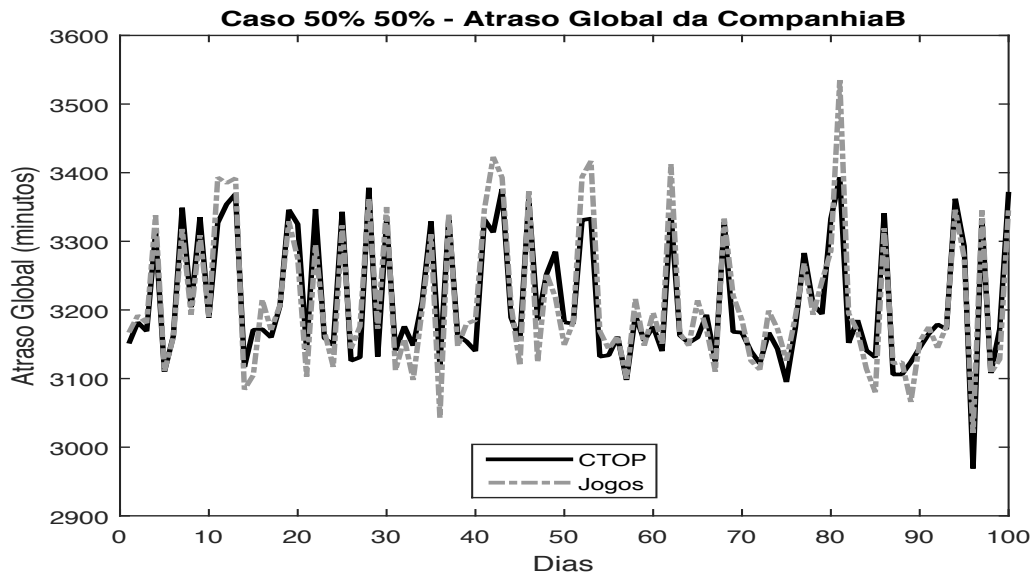


Figura 6.3: Atraso Global da *CompanhiaB*.

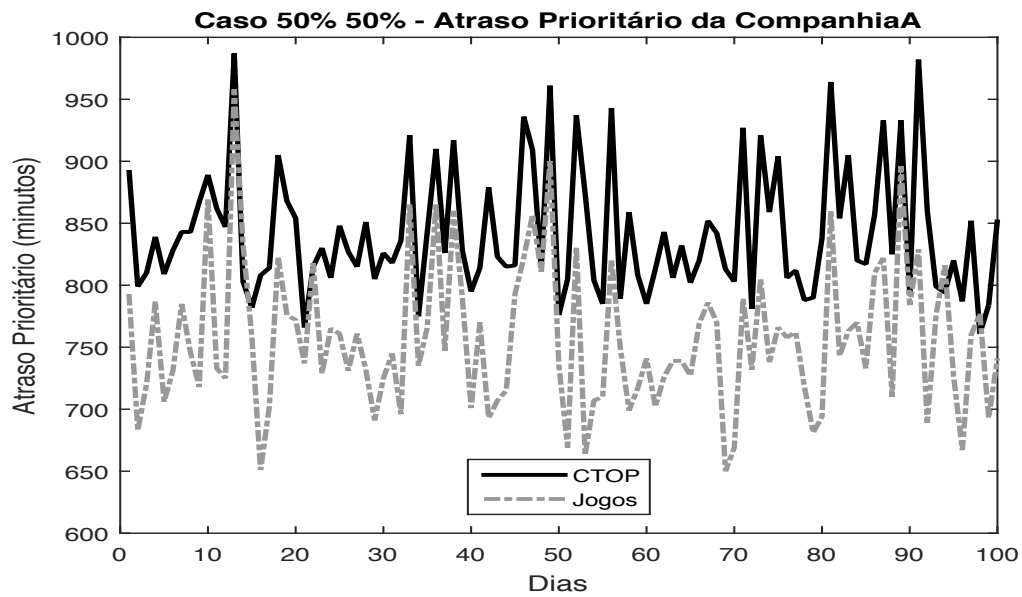


Figura 6.4: Atraso Prioritário da *CompanhiaA*.

O menor valor de atraso prioritário da *CompanhiaA* foi 650 minutos no dia 69 e o menor da *CompanhiaB* foi de 479 minutos no dia 88.

A Figura 6.6 mostra a média dos atrasos globais da *CompanhiaA* e da *CompanhiaB* para o CTOP e Jogos. Os valores da média pelo CTOP e por Jogos são quase iguais, sendo que a *CompanhiaB* teve uma média de atraso global inferior a *CompanhiaA*.

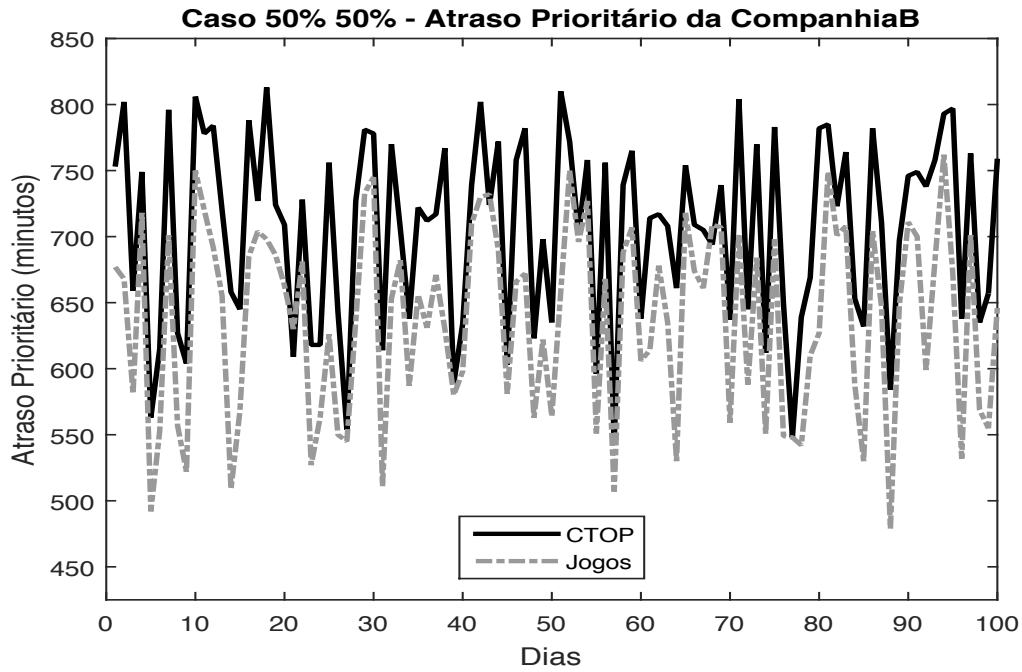


Figura 6.5: Atraso Prioritário da *CompanhiaB*.

A *CompanhiaA* teve cerca de 3557 minutos de atraso global pelo CTOP e 3564 minutos para Jogos e a *CompanhiaB* 3211 para o CTOP e 3213 para Jogos, ou seja, a *CompanhiaB* teve aproximadamente 10% menos atraso global que a *CompanhiaA* e a diferença entre CTOP e Jogos das duas companhias aéreas foi menos de 1%.

A *CompanhiaA* apresentou 842 minutos de atraso pelo CTOP e 757 minutos por Jogos cerca de 10% menos atraso que o CTOP, enquanto a *CompanhiaB* teve média de 705 minutos pelo CTOP e 638 minutos por Jogos cerca de 10% menos atraso que pelo CTOP e a *CompanhiaB* teve as médias de atraso inferiores que a *CompanhiaA*.

#### 6.4.2 Caso 2: 67%B e 33%A

O caso 67% 33% teve 82 voos para a *CompanhiaB* e 41 voos para a *CompanhiaA*.

A Figura 6.8 mostra o atraso global para a *CompanhiaA* e a Figura 6.9 o atraso global da *CompanhiaB*.

Assim como observado no caso anterior, o atraso global para o CTOP e para Jogos tanto para a *CompanhiaA* quanto para a *CompanhiaB* possuem valores semelhantes.

A Figura 6.10 mostra o atraso prioritário para a *CompanhiaA* e a Figura 6.11 o atraso prioritário da *CompanhiaB*.



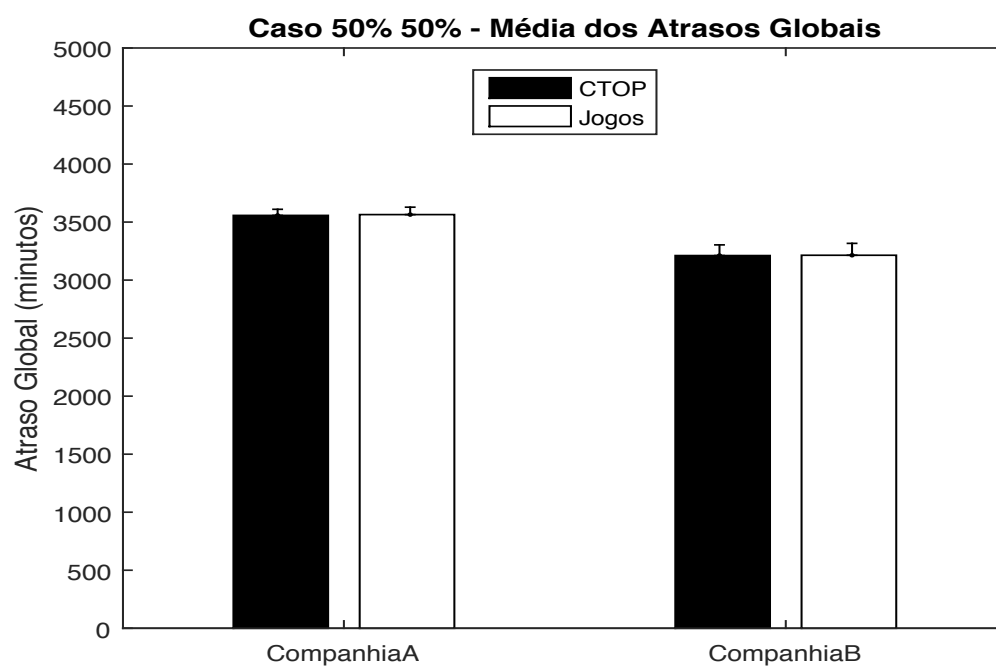


Figura 6.6: Média dos Atrasos Globais .

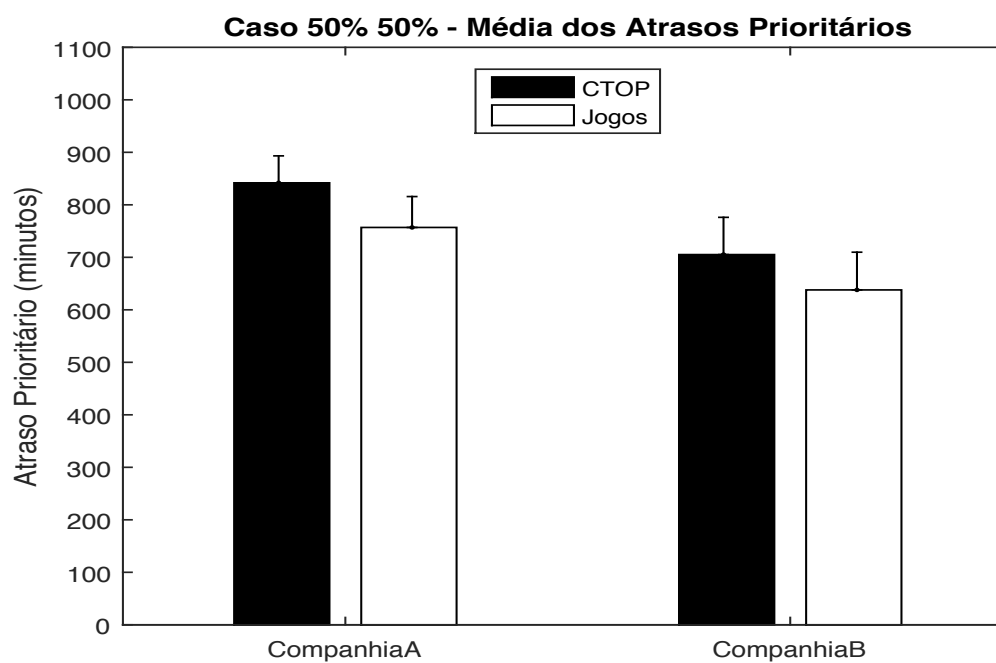


Figura 6.7: Média dos Atrasos Prioritários .

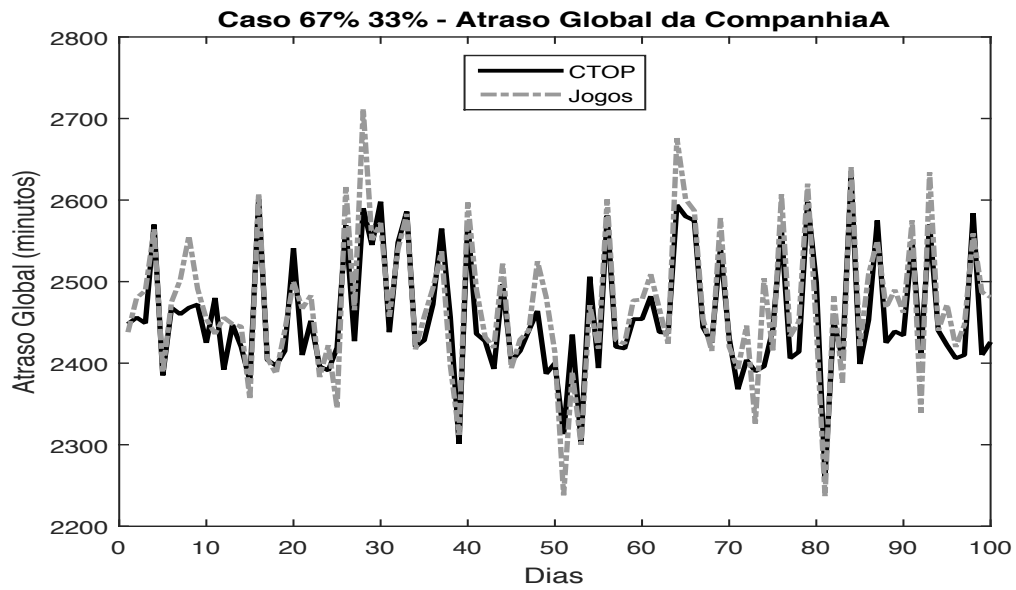


Figura 6.8: Atraso Global da *CompanhiaA*.

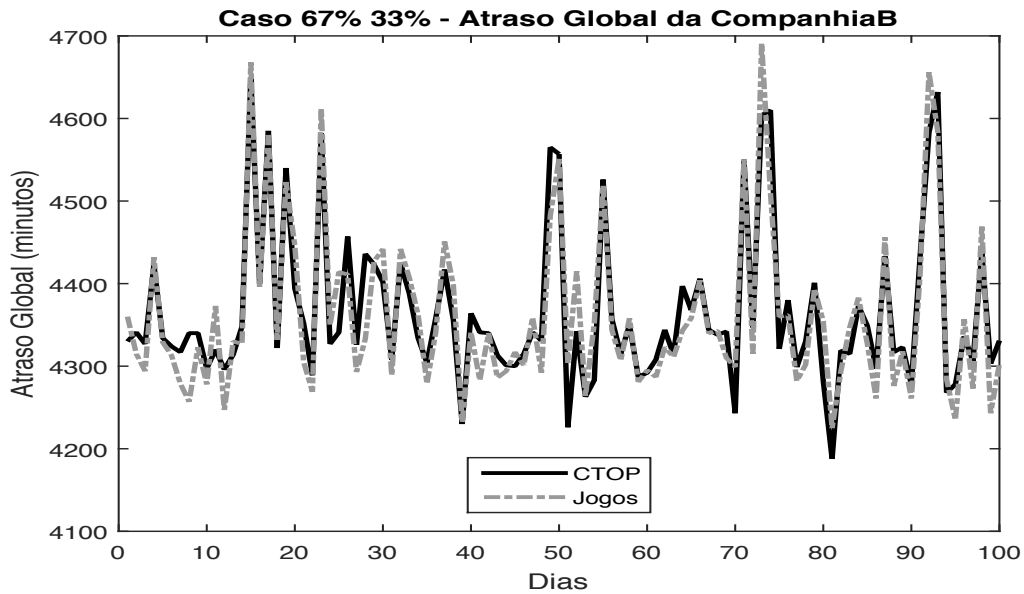


Figura 6.9: Atraso Global da *CompanhiaB*.

Mesmo com a distribuição de voos diferentes para as companhias aéreas, ambas possuem o atraso prioritário por Jogos inferior ao pelo CTOP, principalmente a *CompanhiaB*.

No dia 17 do atraso prioritário da *CompanhiaA*, o algoritmo de Jogos diminuiu o atraso do CTOP em cerca de 35% enquanto para a *CompanhiaB* a maior porcentagem foi encontrada no dia 100 em que por Jogos obteve-se cerca de 18% menos atraso.

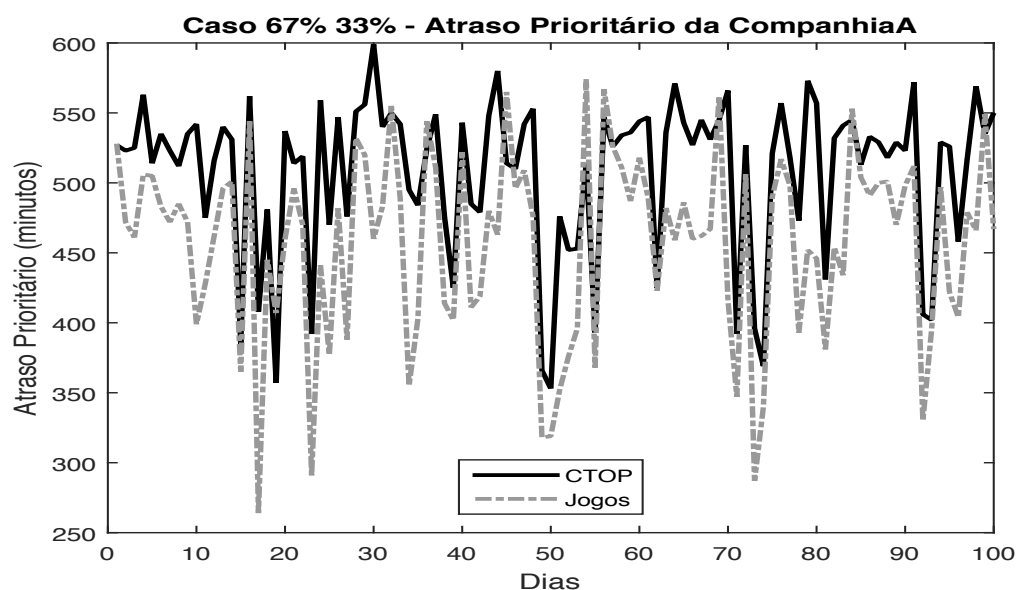


Figura 6.10: Atraso Prioritário da *CompanhiaA*.

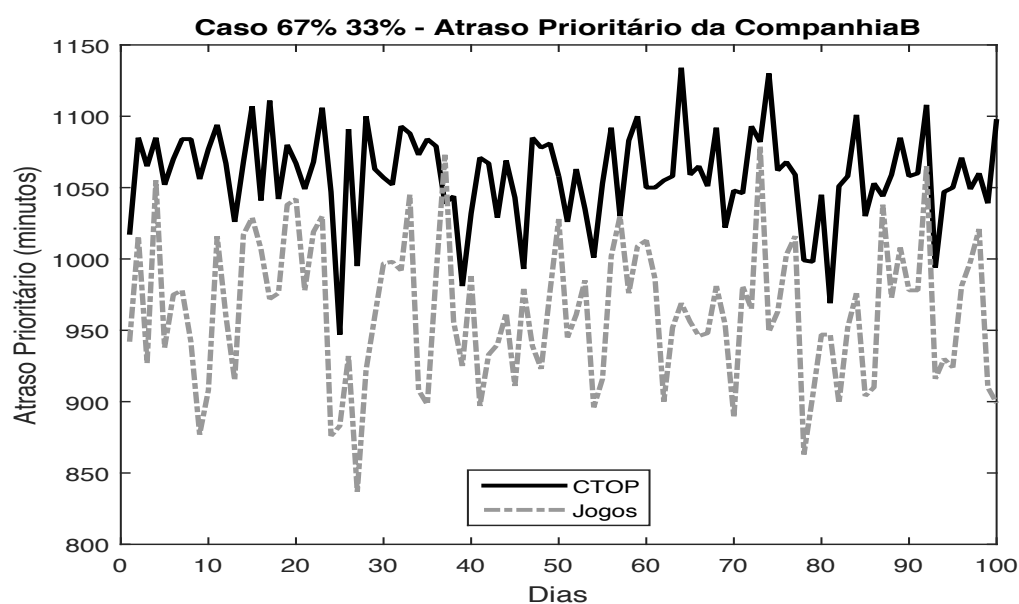


Figura 6.11: Atraso Prioritário da *CompanhiaB*.

A Figura 6.12 ilustra a média dos atrasos globais das companhias aéreas e a Figura 6.13 contém a média dos atrasos prioritários da *CompanhiaA* e *CompanhiaB*.

O atraso global por Jogos e pelo CTOP são quase iguais. A *CompanhiaB* com 67% dos voos teve média de aproximadamente 4363 minutos e a *CompanhiaA* teve média de aproximadamente 2464 minutos para o CTOP e Jogos.

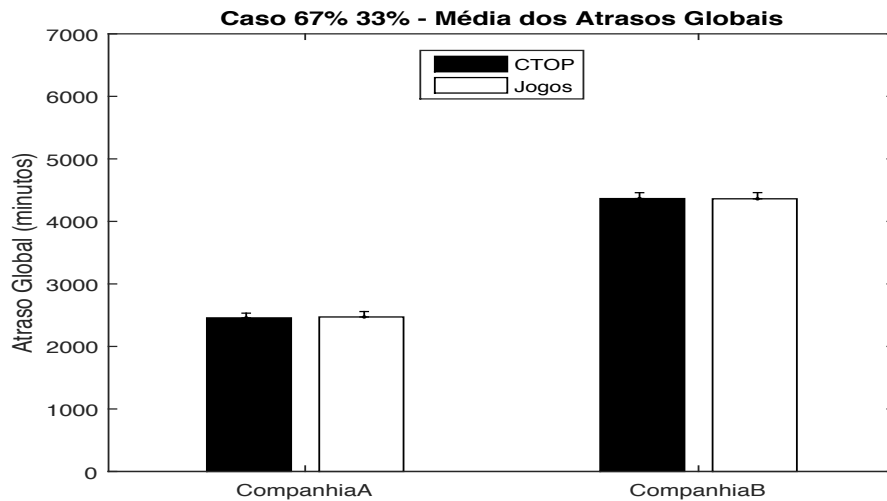


Figura 6.12: Média dos Atrasos Globais.

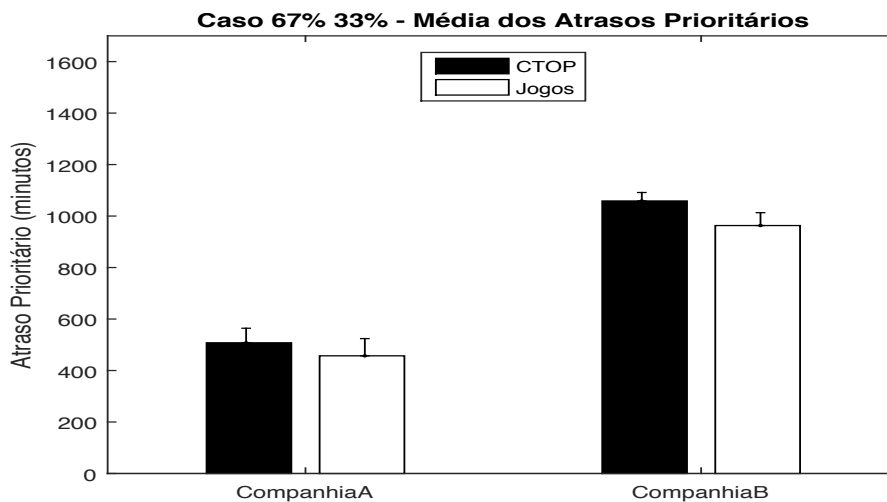


Figura 6.13: Média dos Atrasos Prioritários .

Para a média dos atrasos prioritários da *CompanhiaA* e *CompanhiaB*, observa-se que a *CompanhiaB* se beneficiou mais do uso de Jogos do que a *CompanhiaA* em que seu atraso prioritário não sofreu muita alteração.

Pelo CTOP e por jogos, respectivamente, a *CompanhiaA* teve média de 508 e 457 minutos e a *CompanhiaB* teve 1059 e 963 minutos de atraso prioritário.

### 6.4.3 Caso 3: 75%B e 25%A

O caso 75% 25% teve 93 voos para a *CompanhiaB* e 30 voos para a *CompanhiaA*.

A Figura 6.14 e Figura 6.15 mostra o atraso global para a *CompanhiaA* e *CompanhiaB*.

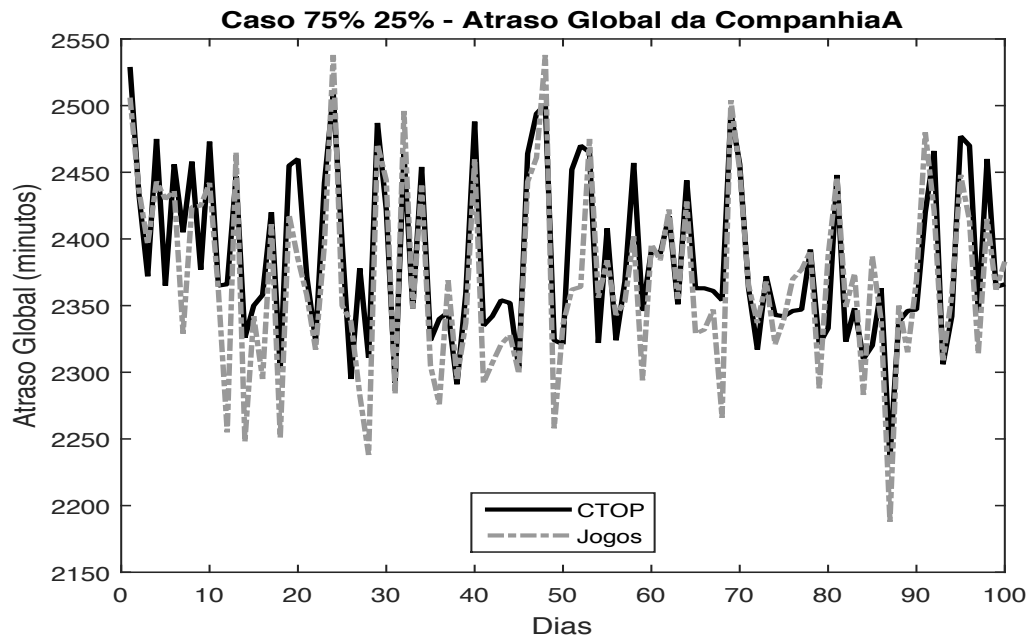


Figura 6.14: Atraso Global da *CompanhiaA* .

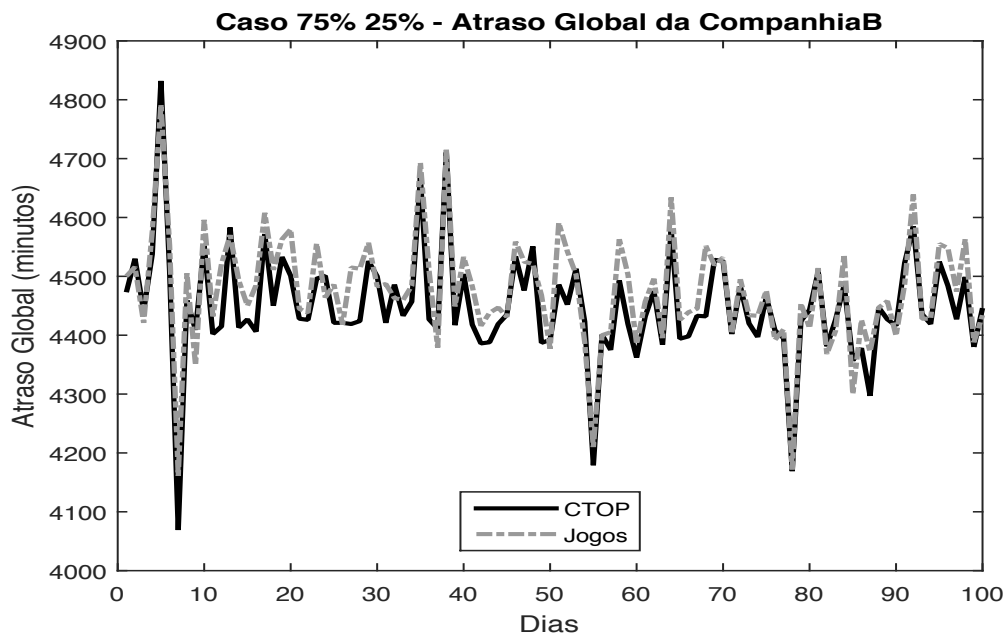


Figura 6.15: Atraso Global da *CompanhiaB* .

O atraso global apresenta comportamento similar aos casos 50%/50% e 67%/33%, pois o algoritmo de Jogos apresenta valores semelhantes ao de CTOP.

A Figura 6.16 e Figura 6.17 mostra o atraso prioritário para a *CompanhiaA* e *CompanhiaB*.

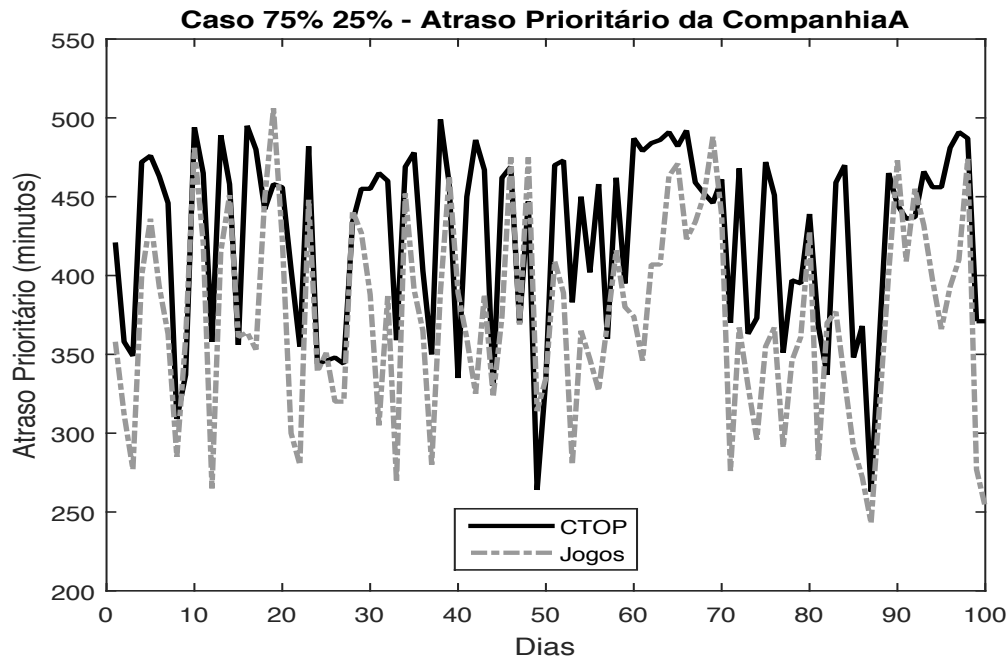


Figura 6.16: Atraso Prioritário da *CompanhiaA* .

No dia 31 do atraso prioritário da *CompanhiaA* na Figura 6.16, o algoritmo de Jogos diminuiu cerca 34% do atraso comparado com o CTOP. Para o atraso prioritário da *CompanhiaB* na Figura 6.17, o dia 85 teve a menor diminuição com cerca de 19% de redução comparado ao CTOP.

Nesse caso ao observar os gráficos, o atraso prioritário por Jogos parece não se destacar tanto como nos casos anteriores, entretanto, ao analisar a porcentagem de diminuição, percebe-se resultados bem semelhantes ao caso 67% e 33%.

Os resultados das médias são encontradas na Figura 6.18 e Figura 6.19.

Assim como observado nos casos anteriores, o atraso global permaneceu bem semelhante para o CTOP e para Jogos. Para o atraso prioritário, nota-se a eficácia do uso de Jogos que apresentou melhores médias de atraso prioritário que o CTOP para todos os casos de estudo.

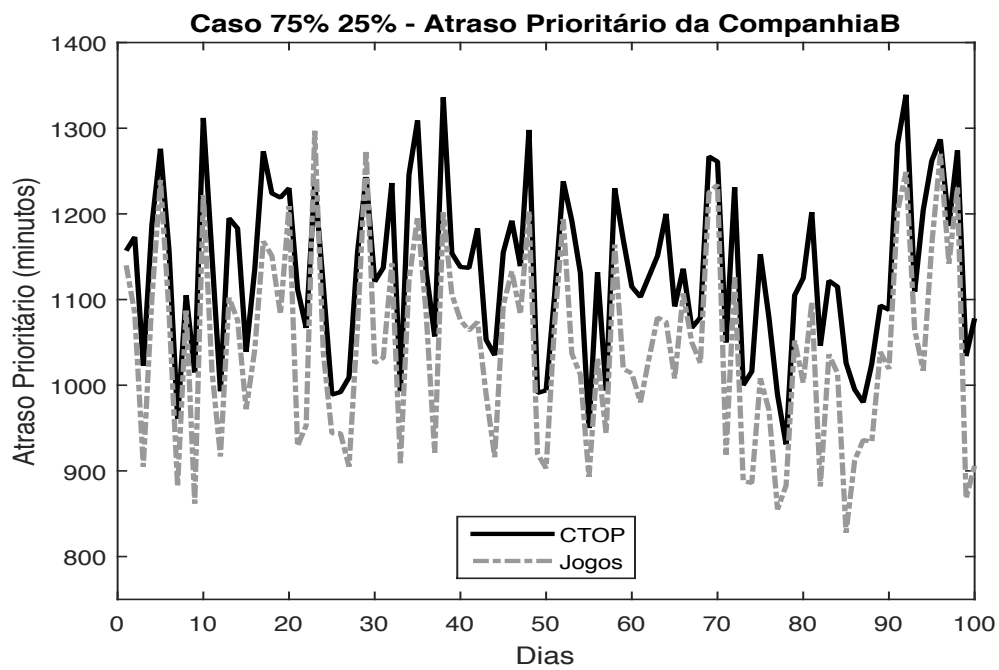


Figura 6.17: Atraso Prioritário da *CompanhiaB* .

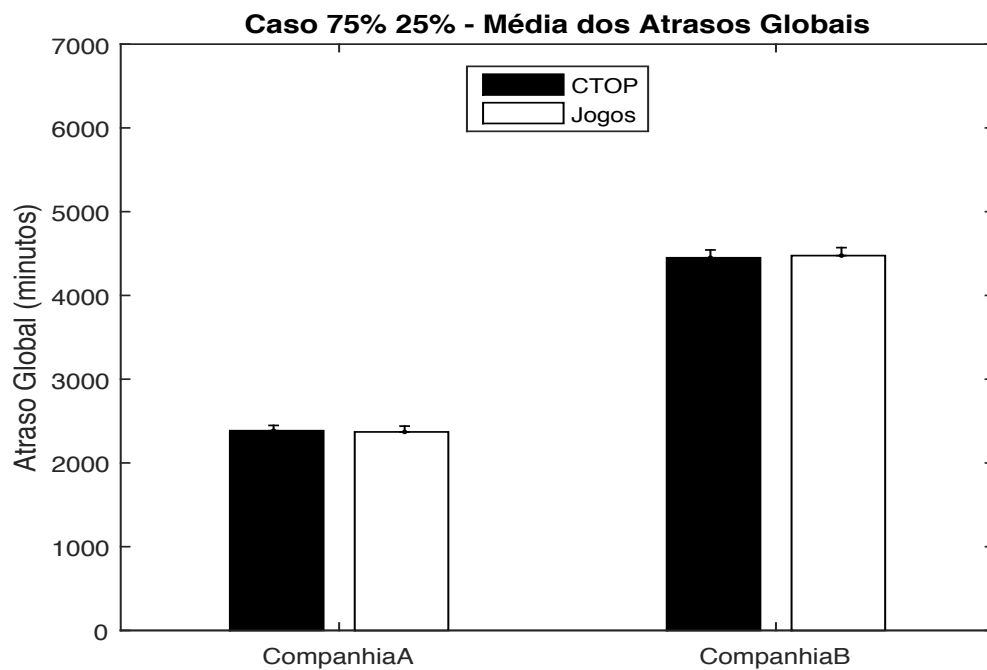


Figura 6.18: Média dos Atrasos Globais .

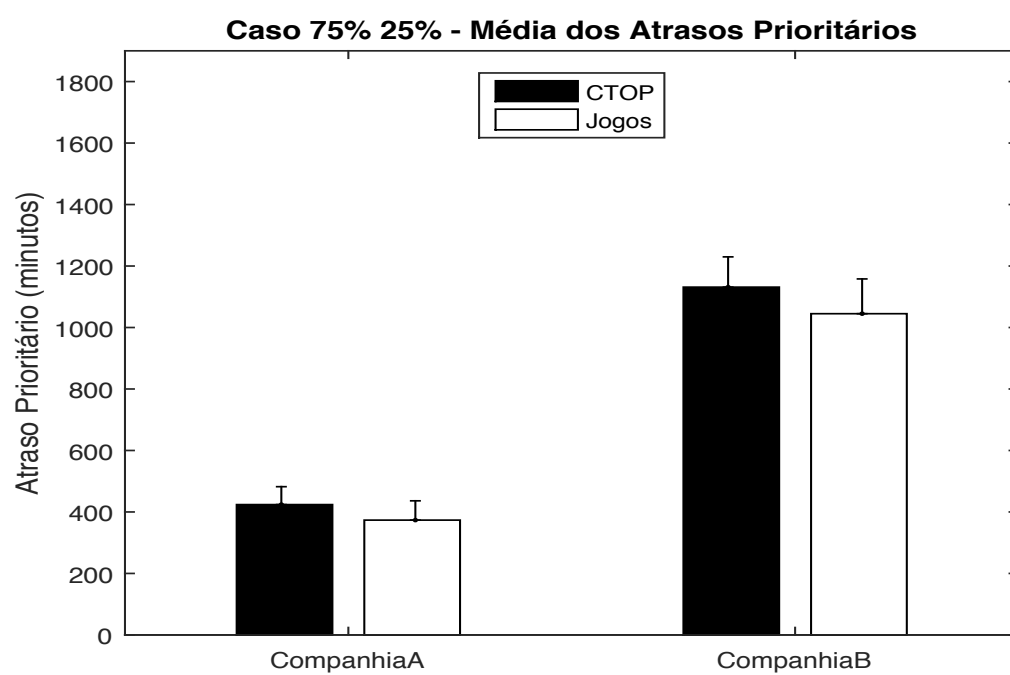


Figura 6.19: Média dos Atrasos Prioritários .



# Capítulo 7

## Considerações Finais

Este trabalho apresentou uma solução computacional de otimização do gerenciamento do tráfego aéreo para situações adversas.

O projeto baseou-se em um Sistema de Suporte à Decisão com a utilização do algoritmo do Programa de Opções de Trajetórias Colaborativo (*Collaborative Trajectory Options Program*) (CTOP) e Teoria dos Jogos para a alocação de *slots* em que a análise dos resultados é apresentada na Seção 7.1 e as propostas de trabalhos futuros são apresentadas na Seção 7.2.

### 7.1 Avaliação dos Resultados

Atualmente, o gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo brasileiro não possui uma solução computacional em vigor para efetuar a alocação de *slots* dos voos que são afetados por situações imprevisíveis e precisam ter seus horários reajustados.

A finalidade deste projeto foi proporcionar uma solução para que os voos não fossem completamente impedidos de voar ou terem um atraso descomunal, o que acontece no cenário atual para situação adversas.

O sistema criado apresentou um algoritmo com a variância de muitos parâmetros para simular a imprevisibilidade de acontecimentos com impacto nos horários de alocação dos voos. Além disso, incorporou-se o CTOP para esses casos, iniciativa que já está em uso nos Estados Unidos, adaptado para o cenário aéreo brasileiro.

Com o uso do CTOP adaptado, pôde-se obter a alocação de todos os voos suportados pelas áreas restritas definidas neste trabalho e os demais voos que não obtiveram *slots* ficaram sujeitos a voarem por fora das áreas restritas. Os voos considerados como exceção tiveram o menor atraso possível enquanto o restante foi alocado de acordo com seu horário de entrada nas áreas restritas.

O uso de Teoria dos Jogos possibilitou a redução do impacto dos atrasos nas companhias aéreas e permitiu gerar casos em que as companhias foram obrigadas a cooperar uma com a outra de forma que houvesse um equilíbrio na distribuição dos atrasos e resultados mais justos.

Com a negociação por Teoria dos Jogos, cada companhia aérea teve a oportunidade de trocar seus *slots* previamente alocados pelo CTOP por *slots* que diminuíssem os atrasos para seus voos considerados com alta prioridade, chamados de prioritários.

Os três casos escolhidos no Estudo de Caso mostraram que independente da proporção de voos por parte das companhias aéreas, ambas se beneficiaram com a redução dos atrasos em voos prioritários e, basicamente, os atrasos globais foram bem semelhantes aos obtidos com o CTOP.

A Tabela 7.1 mostra os melhores resultados obtidos nos estudos de caso com a redução em porcentagem do atraso dos voos prioritários usando o algoritmo de Teoria dos Jogos em relação ao CTOP.

Tabela 7.1: Melhores Resultados dos Atrasos Prioritários com Jogos

	CompanhiaA	CompanhiaB
	Redução	Redução
Caso 50% 50%	24.14%	22.64%
Caso 67% 33%	35.29%	18.12%
Caso 75% 25%	34.41%	19.30%

O algoritmo implementado com Teoria dos Jogos proporcionou uma redução de até 35% dos atrasos prioritários comparado com o algoritmo convencional do CTOP, o qual revela a eficiência da implementação, além de apresentar bons resultados para todos os casos de estudo realizados.

Embora tenham sido definidos alguns parâmetros fixos no algoritmo, esses parâmetros podem ser alterados assim como os parâmetros sorteados, revelando a versatilidade da implementação. Além do mais, não houve ênfase em nenhuma companhia aérea específica, pois o projeto foi definido para trazer benefícios para qualquer companhia que utilizasse o sistema.

A limitação do projeto consiste em não haver no cenário aéreo atual brasileiro muitas rotas pelas quais as aeronaves possam passar e, dessa forma, pode acontecer das aeronaves terem que compartilhar da mesma rota, o que tornaria uma área restrita bastante limitada para receber uma grande quantidade de voos, o qual é um dos conceitos para a aplicação do algoritmo criado.

Contudo, a evolução do tráfego aéreo prevê um aumento na quantidade de rotas para que haja um gerenciamento mais eficiente, desse modo, o sistema para otimização do

gerenciamento do tráfego aéreo com uso do CTOP e Teoria dos Jogos é uma alternativa para diminuição de atrasos em uma área restrita.

## 7.2 Trabalhos Futuros

O âmbito da aviação brasileira atual não possui programas semelhantes ao Programa de Trajetórias Colaborativo, dessa forma sua inserção abre margem para várias adaptações de modo que o programa se encaixe melhor ao contexto do Brasil.

Possíveis trabalhos futuros incluem:

- Aprimorar as estratégias do jogo para que se defina melhores jogadas e, consequentemente, melhores resultados.
- Acrescentar mais companhias aéreas para gerar mais cenários de negociações.
- Utilizar maior número de voos para que fique mais compatível com a realidade.
- Adicionar mais áreas de restrição para contemplar um maior número de possíveis áreas limitadas.
- Incluir maior variância dos parâmetros escolhidos para definir com maior precisão os resultados.
- Proporcionar uma solução para os voos sem *slots* que acabam sendo prejudicados com um grande atraso por não terem *slot*.

# Referências

- [1] Shim, Jung P, Merrill Warkentin, James F Courtney, Daniel J Power, Ramesh Sharda e Christer Carlsson: *Past, present, and future of decision support technology*. Decision support systems, 33(2):111–126, 2002. 11, 22, 23
- [2] Agogino, Adrian e Kagan Tumer: *Regulating air traffic flow with coupled agents*. Em *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems-Volume 2*, páginas 535–542. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2008. 11, 19, 25, 26
- [3] Agogino, Adrian e Kagan Tumer: *Learning indirect actions in complex domains: Action suggestions for air traffic control*. Advances in Complex Systems, 12(04n05):493–512, 2009. 11, 26, 27
- [4] Crespo, Antonio Márcio Ferreira: *Aprendizagem por reforço aplicada ao gerenciamento tático do fluxo de tráfego aéreo*. 2010. 11, 39
- [5] CGNA: *Aeroportos do brasil*. <http://portal.cgna.gov.br/>, 2017. Disponível Online, Novembro 2017. 11, 40
- [6] Canino-Rodríguez, José M, Jesús García-Herrero, Juan Besada-Portas, Antonio G Ravelo-García, Carlos Travieso-González e Jesús B Alonso-Hernández: *Human computer interactions in next-generation of aircraft smart navigation management systems: Task analysis and architecture under an agent-oriented methodological approach*. Sensors, 15(3):5228–5250, 2015. 11, 42
- [7] Lagios, E: *Airport cdm implementation-the manual*. available on: <http://www.euro-control.int/publications/airport-cdm-implementationmanual-version-4> [Last access: 2016/05/26], 2012. 11, 45, 46
- [8] Cruciol, Leonardo Luiz Barbosa Vieira: *Otimização de negociação dinâmica para múltiplas áreas restritas de fluxo no programa de opções de trajetórias colaborativo*. 2016. 11, 25, 50, 66, 67, 68
- [9] Kim, Bosung e John Paul Clarke: *Optimal airline actions during collaborative trajectory options programs*. 2014. 11, 53, 62, 63, 64, 65
- [10] Miller, Mary Ellen e William D Hall: *Collaborative trajectory option program demonstration*. Em *Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2015 IEEE/AIAA 34th*, páginas 1C1–1. IEEE, 2015. 11, 53, 54, 55

- [11] BOEING: *Brazil routes*, 2016. 11, 56
- [12] Ribeiro, Vitor Filincowsky: *Decisão colaborativa com utilização de teoria dos jogos para o sequenciamento de partidas em aeroportos*. 2013. 11, 13, 59, 60, 61, 62
- [13] Maps, Google: *Mapa do brasil com as fca's e aeroportos*. <https://www.google.com.br/maps>, 2017. Disponível Online, Novembro 2017. 12, 88
- [14] SAC/PR: *Cenário da aviação brasileira*. <http://www.aviacao.gov.br/obrasilquevoa/cenario-da-aviacao-brasileira.php>, 2017. Disponível Online, Agosto 2017. 20
- [15] FAA: *Advisory circular 90-115*, 2014. Disponível Online, Agosto 2017. 20
- [16] Simon, Herbert A: *The new science of management decision*. 1960. 22
- [17] Guerlain, Stephanie, Donald E Brown e Christina Mastrangelo: *Intelligent decision support systems*. Em *Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference on*, volume 3, páginas 1934–1938. IEEE, 2000. 22
- [18] Pearson, J Michael e JP Shim: *An empirical investigation into dss structures and environments*. *Decision Support Systems*, 13(2):141–158, 1995. 22
- [19] Gorry, George Anthony e Michael S Scott Morton: *A framework for management information systems*. 1971. 22
- [20] Keen, Peter GW, MichaelS Scott *et al.*: *Decision support systems; an organizational perspective*. Relatório Técnico, 1978. 22
- [21] Aronson, Jay E, Ting Peng Liang e E Turban: *Decision support systems and intelligent systems*. Pearson Prentice-Hall, 2005. 23
- [22] Beulens, Adrie JM e JAEE Van Nunen: *The use of expert system technology in dss*. *Decision Support Systems*, 4(4):421–431, 1988. 24
- [23] Lesser, Victor R: *Cooperative multiagent systems: A personal view of the state of the art*. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 11(1):133–142, 1999. 25
- [24] Norvig, P. e S. Russell: *Inteligência Artificial: Tradução da 3a Edição*. Elsevier Brasil, 2013, ISBN 9788535251418. 25, 28
- [25] Von Neumann, John e Oskar Morgenstern: *Theory of games and economic behavior*. Princeton University Press Princeton, NJ, 1945. 27, 28
- [26] Myerson, R.B.: *GAME THEORY*. Harvard University Press, 2013, ISBN 9780674728615. 27
- [27] Osborne, Martin J e Ariel Rubinstein: *A course in game theory*. MIT press, 1994. 27
- [28] Di Benedetto, C Anthony: *Modeling rationality in marketing decision-making with game theory*. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 15(4):22–32, 1987. 27

- [29] Sotomayor, Marilda Antônia de Oliveira e Maurício Soares Bugarin: *Lições sobre Teoria dos Jogos*. 2007. 28, 29
- [30] Azevedo, Guilherme, Henrique F Carvalho e Jorge F SILVA: *A teoria dos jogos na estratégia de negócios: uma contribuição relevante*. Texto para Discussão da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1(1):1–29, 2011. 29
- [31] Poundstone, William: *Prisoner's Dilemma/John von Neumann, Game Theory and the Puzzle of the Bomb*. Anchor, 1993. 31
- [32] Rasmusen, Eric e Basil Blackwell: *Games and information*. Cambridge, MA, 15, 1994. 31, 32, 33, 36
- [33] Nash, John: *Non-cooperative games*. Annals of mathematics, páginas 286–295, 1951. 32
- [34] TAVARES, MP: *Teoria dos jogos: Algumas aplicações ao mercado de trabalho. rio de janeiro: Puc*. dez, 1995. 33
- [35] Nash Jr, John F: *The bargaining problem*. Econometrica: Journal of the Econometric Society, páginas 155–162, 1950. 34
- [36] Kalai, Ehud e Meir Smorodinsky: *Other solutions to nash's bargaining problem*. Econometrica: Journal of the Econometric Society, páginas 513–518, 1975. 35
- [37] Nash, John: *Two-person cooperative games*. Econometrica: Journal of the Econometric Society, páginas 128–140, 1953. 35
- [38] Levin, Jonathan: *Bargaining and repeated games*, 2002. 36
- [39] Fudenberg, Drew e Eric Maskin: *The folk theorem in repeated games with discounting or with incomplete information*. Em *A Long-Run Collaboration On Long-Run Games*, páginas 209–230. World Scientific, 2009. 36
- [40] DECEA: *Serviço de gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo - ica 100-22*. <https://publicacoes.decea.gov.br/>, 2010. Disponível Online, Outubro 2017. 37, 43
- [41] Silva, Alexandre Magno Gonzaga da: *Sistema de simulação a acelerado para análise de fluxo de tráfego aéreo*. SILVA, 681(06):629–7, 2001. 37
- [42] Arruda Jr, AC: *Aprendizagem por reforço aplicada à análise de impacto no controle de fluxo de tráfego aéreo*. Tese de Doutorado, Master's thesis, University of Brasília–Science of Computation Department, 2009. 37
- [43] DECEA: *Concepção operacional atm nacional - dca 351-2*. <https://publicacoes.decea.gov.br/>, 2011. Disponível Online, Outubro 2017. 37
- [44] DECEA: *Serviços de tráfego aéreo - ica 100-37*. <https://publicacoes.decea.gov.br/>, 2016. Disponível Online, Outubro 2017. 37, 40, 41, 43, 44, 45

- [45] DECEA: *Uso flexível do espaço aéreo - dca 100-2*. <https://publicacoes.decea.gov.br/>, 2017. Disponível Online, Outubro 2017. 37, 38, 45
- [46] DECEA: *Espaço aéreo brasileiro*. <https://www.decea.gov.br/>, 2016. Disponível Online, Outubro 2017. 38
- [47] ANAC: *Aeroportos*. <http://www.anac.gov.br/>, 2016. Disponível Online, Novembro 2017. 40
- [48] CGNA: *Anuário estatístico de tráfego aéreo - 2016*. <http://portal.cgna.gov.br/>, 2016. Disponível Online, Agosto 2017. 40, 87
- [49] DECEA: *Sistema de controle do espaço aéreo brasileiro*. <http://www.decea.gov.br/>, 2017. Disponível Online, Novembro 2017. 41
- [50] Camargo, Gilberto de Menezes: *Controle da pressão seletiva em algoritmo genético aplicado a otimização de demanda em infra-estrutura aeronáutica*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2006. 41
- [51] Ribeiro, Vitor Filincowsky e William Rafael de Jesus Ribeiro: *Previsão de cenário para o controle de tráfego aéreo do cindacta i*. 2008. 42
- [52] DECEA: *Aeródromos coordenados - ica 100-41*. <https://publicacoes.decea.gov.br/>, 2016. Disponível Online, Novembro 2017. 43
- [53] ANAC: *Coordenação de slots - anac - comunicado 38/2016*. <https://www.anac.gov.br/>, 2016. Disponível Online, Novembro 2017. 43
- [54] ANAC: *Resolução nº 338, de 22 de julho de 2014*. <https://www.anac.gov.br/>, 2014. Disponível Online, Novembro 2017. 43
- [55] Authority, Civil Aviation: *Wake turbulence*. New Zealand Government, 2008. 44
- [56] Hoffman, Robert L: *Assessing the benefits of collaborative decision making in air traffic management*. Air Transportation Systems Engineering, 2001. 45
- [57] EUROCONTROL: *Airport cdm implementation - the manual for collaborative decision making*. 2010. 45
- [58] EUROCONTROL: *Airport cdm applications guide*. 2003. 46
- [59] EUROCONTROL: *Airport cdm implementation - the manual for collaborative decision making*. 2017. 47
- [60] NBAA: *Faa's new ctop initiative aims to reduce airspace congestion*. <https://www.nbaa.org/>, 2012. Disponível Online, Novembro 2017. 49
- [61] FAA: *Traffic flow management-modernization (tfm-m) program*. <http://cdm.fly.faa.gov/>, 2012. Traffic Flow Management System (TFMS) Collaborative Trajectory Options Program (CTOP) Interface Control Document (ICD) for the Traffic Flow Management-Modernization (TFM-M) Program. 50

- [62] FAA: *Advisory circular 90-115*. 2014. 51
- [63] Golibersuch, M: *Ctop assignment algorithm and substitution processing*. 2012. FAA PMO Industry Forum 2012 AJM-222. 52
- [64] DECEA: *Programa sirius*. <https://www.decea.gov.br/>, 2017. Disponível Online, Novembro 2017. 57
- [65] ANAC: *Sistema integrado de informações da aviação civil*. <https://sistemas.anac.gov.br/>, 2017. Disponível Online, Novembro 2017. 70



# Apêndice A

## Tabelas do Estudo de Caso

Tabela A.1: Voos Utilizados

ID	Companhia	Origem	Destino	Partida	Chegada	Prioridade
A1	companhiaB	SBEG	SBGR	15:10:00	17:00:00	N
A2	companhiaB	SBFZ	SBGR	15:07:00	17:05:00	N
A3	companhiaA	SBTE	SBSP	15:00:00	17:09:00	N
A4	companhiaB	SBBE	SBSP	14:30:00	17:11:00	N
A5	companhiaB	SBSV	SBGR	14:46:00	17:14:00	N
A6	companhiaB	SBBR	SBSP	15:45:00	17:15:00	N
A7	companhiaB	SBGO	SBSP	15:45:00	17:20:00	N
A8	companhiaB	SBRF	SBGR	14:00:00	17:20:00	N
A9	companhiaA	SBCF	SBGR	16:10:00	17:25:00	N
A10	companhiaA	SBRF	SBSP	14:10:00	17:25:00	N
A11	companhiaA	SBJP	SBSP	14:30:00	17:30:00	N
A12	companhiaA	SBBR	SBGR	15:45:00	17:35:00	N
A13	companhiaA	SBSG	SBSP	13:30:00	17:35:00	N
A14	companhiaB	SBAR	SBSP	14:48:00	17:36:00	N
A15	companhiaA	SBSV	SBGR	15:05:00	17:40:00	N
A16	companhiaB	FAOR	SBGR	6:55:00	17:40:00	H
A17	companhiaA	SBCF	SBSP	16:30:00	17:45:00	N
A18	companhiaA	SBFZ	SBGR	14:15:00	17:45:00	N
A19	companhiaA	SBMO	SBSP	15:30:00	17:45:00	N
A20	companhiaB	SBTE	SBSP	15:50:00	17:45:00	N
A21	companhiaB	SBBR	SBGR	15:30:00	17:50:00	N
A22	companhiaA	SBEG	SBGR	15:50:00	18:00:00	N

A23	companhiaA	SBBE	SBGR	15:50:00	18:05:00	N
A24	companhiaA	SBSL	SBGR	14:47:00	18:07:00	N
A25	companhiaA	SBFZ	SBSP	16:10:00	18:10:00	N
A26	companhiaA	SBEG	SBSP	16:10:00	18:13:00	N
A27	companhiaA	SBRF	SBGR	14:49:00	18:18:00	N
A28	companhiaB	SBSV	SBSP	15:52:00	18:18:00	N
A29	companhiaA	SBGO	SBSP	16:50:00	18:20:00	N
A30	companhiaB	SBSG	SBGR	15:01:00	18:21:00	N
A31	companhiaB	SBJP	SBSP	15:25:00	18:26:00	N
A32	companhiaB	SBAR	SBSP	16:45:00	18:31:00	N
A33	companhiaB	SBBR	SBSP	16:48:00	18:32:00	N
A34	companhiaB	SBCF	SBGR	16:45:00	18:35:00	N
A35	companhiaB	SBCG	SBSP	16:38:00	18:40:00	N
A36	companhiaB	SBGO	SBGR	15:15:00	18:44:00	N
A37	companhiaB	SBTE	SBSP	16:35:00	18:45:00	N
A38	companhiaA	SBSL	SBGR	15:43:00	18:48:00	N
A39	companhiaA	SBPJ	SBSP	16:45:00	18:50:00	N
A40	companhiaA	SBSG	SBSP	14:55:00	18:53:00	N
A41	companhiaA	SBMO	SBGR	15:56:00	18:57:00	N
A42	companhiaB	SBSG	SBGR	15:35:00	19:00:00	N
A43	companhiaA	SBEG	SBSP	16:05:00	19:05:00	N
A44	companhiaB	SBBR	SBGR	17:21:00	19:06:00	N
A45	companhiaB	SBJP	SBSP	16:15:00	19:09:00	N
A46	companhiaB	KMIA	SBGR	10:45:00	19:10:00	H
A47	companhiaA	SBCF	SBGR	17:56:00	19:13:00	N
A48	companhiaA	SBBE	SBSP	16:05:00	19:15:00	N
A49	companhiaA	SBRF	SBGR	15:55:00	19:15:00	N
A50	companhiaB	SBSG	SBGR	15:35:00	19:18:00	N
A51	companhiaA	SBAR	SBGR	17:04:00	19:21:00	N
A52	companhiaB	SBAR	SBSP	17:20:00	19:23:00	N
A53	companhiaA	SBFZ	SBGR	17:30:00	19:35:00	N
A54	companhiaB	SBSV	SBSP	17:48:00	19:39:00	N
A55	companhiaB	SBEG	SBGR	15:45:00	19:40:00	N
A56	companhiaA	SBGO	SBSP	18:03:00	19:40:00	N
A57	companhiaB	SBRF	SBGR	16:20:00	19:40:00	N

A58	companhiaB	SBBR	SBSP	18:00:00	19:45:00	N
A59	companhiaA	SBCF	SBGR	17:30:00	19:45:00	N
A60	companhiaB	SBFZ	SBGR	16:15:00	19:45:00	N
A61	companhiaB	SBJP	SBGR	16:45:00	19:50:00	N
A62	companhiaB	SBFZ	SBGR	16:30:00	19:50:00	N
A63	companhiaB	SBBE	SBGR	16:15:00	20:00:00	N
A64	companhiaA	SBTE	SBGR	18:20:00	20:00:00	N
A65	companhiaA	SBMO	SBSP	17:15:00	20:09:00	N
A66	companhiaA	SBCF	SBSP	19:00:00	20:11:00	N
A67	companhiaA	SBRF	SBGR	17:00:00	20:13:00	N
A68	companhiaA	SBSV	SBGR	17:40:00	20:15:00	N
A69	companhiaB	SBSL	SBGR	17:05:00	20:20:00	N
A70	companhiaA	SBPJ	SBSP	18:30:00	20:20:00	N
A71	companhiaA	SBBR	SBSP	18:40:00	20:25:00	N
A72	companhiaA	SBBR	SBGR	18:45:00	20:25:00	N
A73	companhiaB	SBEG	SBGR	16:55:00	20:30:00	N
A74	companhiaB	SBFZ	SBGR	18:00:00	20:30:00	N
A75	companhiaA	SBRF	SBSP	17:34:00	20:35:00	N
A76	companhiaB	SBSV	SBSP	18:52:00	20:41:00	N
A77	companhiaB	SBBR	SBGR	18:41:00	20:43:00	N
A78	companhiaA	SBBR	SBGR	19:00:00	20:45:00	N
A79	companhiaA	SBGO	SBGR	19:06:00	20:45:00	N
A80	companhiaB	SBCF	SBGR	19:30:00	20:55:00	N
A81	companhiaA	SBJP	SBGR	17:45:00	20:55:00	N
A82	companhiaB	SBCF	SBSP	19:49:00	20:57:00	N
A83	companhiaA	SBSG	SBGR	16:58:00	21:03:00	N
A84	companhiaB	SBAR	SBSP	18:10:00	21:05:00	N
A85	companhiaB	SBMO	SBSP	19:07:00	21:09:00	N
A86	companhiaB	SBCG	SBGR	19:28:00	21:10:00	N
A87	companhiaA	SBCY	SBSP	19:32:00	21:14:00	N
A88	companhiaA	KMCO	SBGR	12:20:00	21:15:00	H
A89	companhiaA	SBTE	SBGR	18:59:00	21:16:00	N
A90	companhiaA	SBFZ	SBGR	18:45:00	21:17:00	N
A91	companhiaA	SBSL	SBSP	18:28:00	21:22:00	N
A92	companhiaB	SBMO	SBGR	18:20:00	21:25:00	N

A93	companhiaA	SBPJ	SBSP	19:30:00	21:29:00	N
A94	companhiaB	SBCG	SBGR	19:30:00	21:30:00	N
A95	companhiaB	SBGO	SBSP	20:03:00	21:35:00	N
A96	companhiaB	SBSV	SBGR	19:04:00	21:35:00	N
A97	companhiaB	SBBR	SBSP	19:55:00	21:41:00	N
A98	companhiaB	SBSG	SBSP	18:30:00	21:44:00	N
A99	companhiaB	SBRF	SBSP	18:37:00	21:45:00	N
A100	companhiaA	SBTE	SBGR	18:43:00	21:52:00	N
A101	companhiaB	SBCF	SBSP	20:40:00	21:55:00	N
A102	companhiaB	SBCG	SBGR	20:01:00	21:57:00	N
A103	companhiaA	SBCY	SBGR	19:58:00	21:57:00	N
A104	companhiaA	SBAR	SBSP	18:55:00	22:01:00	N
A105	companhiaA	SBBR	SBGR	20:30:00	22:06:00	N
A106	companhiaA	SBFZ	SBSP	19:00:00	22:10:00	N
A107	companhiaB	SBGO	SBGR	20:45:00	22:12:00	N
A108	companhiaB	SBJP	SBSP	19:20:00	22:13:00	N
A109	companhiaB	SBEG	SBGR	19:03:00	22:18:00	N
A110	companhiaA	SBBE	SBGR	19:05:00	22:20:00	N
A111	companhiaA	SBSV	SBGR	19:50:00	22:20:00	N
A112	companhiaB	SBMO	SBGR	19:28:00	22:23:00	N
A113	companhiaA	SBSG	SBGR	19:09:00	22:26:00	N
A114	companhiaA	SBPJ	SBSP	20:20:00	22:31:00	N
A115	companhiaB	SBSL	SBSP	20:15:00	22:35:00	N
A116	companhiaB	SBAR	SBGR	19:20:00	22:38:00	N
A117	companhiaA	SBBE	SBGR	19:30:00	22:40:00	N
A118	companhiaA	SBCF	SBGR	21:30:00	22:41:00	N
A119	companhiaB	SBCG	SBSP	21:00:00	22:46:00	N
A120	companhiaB	SBCY	SBSP	19:50:00	22:48:00	N
A121	companhiaA	SBBR	SBSP	21:20:00	22:49:00	N
A122	companhiaB	SBFZ	SBGR	20:50:00	22:55:00	N
A123	companhiaA	SBRF	SBGR	18:00:00	22:57:00	N